

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ  
ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ  
ФГБОУ ВО КОСТРОМСКАЯ ГСХА

ПОПОВ Н.М., ОЛИН Д.М.

# **ОСНОВЫ ЭНЕРГЕТИКИ**

Учебное пособие

КАРАБАЕВО  
Костромская ГСХА  
2015

УДК 620.9 : 621.3

ББК 31

П 58

*Авторы:* сотрудники кафедры электроснабжения Костромской ГСХА д.т.н., профессор *Н.М. Попов* и к.т.н., доцент *Д.М. Олин*.

*Рецензенты:* сотрудники кафедры электроснабжения ФГБОУ ВПО Орёл ГАУ к.т.н., заведующий кафедрой *А.В. Виноградов*; к.т.н., доцент *Р.П. Беликов*.

*Рекомендовано к изданию методической комиссией факультета электрификации и автоматизации сельского хозяйства, протокол № 10 от 02 декабря 2014 года.*

П 58     **Попов, Н.М.** Основы энергетики : учебное пособие / Н.М. Попов, Д.М. Олин. — Караваево : Костромская ГСХА, 2015. — 110 с.

В издании приводятся понятия о получении тепловой и электрической энергии, основные формулы электротехники, позволяющие понять принцип передачи электроэнергии от источников к потребителям и работу основных приемников энергии, рассматриваются системы сельскохозяйственного теплоснабжения и водоснабжения.

Учебное пособие по дисциплине «Основы энергетики» предназначено для студентов направления подготовки 35.03.06 «Агроинженерия», профиль «Электрооборудование и электротехнологии», а также может быть использовано по дисциплине «История электроэнергетики и электротехники» для направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Электроснабжение» очной и заочной форм обучения.

УДК 620.9 : 621.3

ББК 31

© ФГБОУ ВО Костромская ГСХА, 2015

© Н.М. Попов, Д.М. Олин, 2015

© РИО Костромской ГСХА, оформление, 2015

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение .....</b>	<b>5</b>
<b>1. Электрические цепи .....</b>	<b>10</b>
1.1. Условные графические изображения .....	11
1.2. Закон Ома .....	12
1.3. Мощность и работа электрического тока.....	14
1.4. Виды соединения резисторов .....	16
1.5. Сопротивления элементов сети переменному току .....	18
1.6. Соотношение сопротивлений и мощностей на переменном токе.....	25
<b>2. Потребители электрической энергии.....</b>	<b>30</b>
2.1. Номинальные напряжения.....	30
2.2. Измерения электрических величин .....	31
2.3. Подключение потребителей по четырехпроводной схеме.....	34
2.4. Подключение потребителей по пятипроводной схеме.....	39
2.5. Принцип работы асинхронного двигателя.....	43
2.6. Обеспечение безопасной эксплуатации электроприемников .....	49
<b>3. Технология работы электростанций.....</b>	<b>52</b>
3.1. Принцип работы конденсационной тепловой электростанции ...	53
3.2. Теплоэлектроцентрали .....	57
3.3. Газотурбинные установки.....	58
3.4. Парогазовые установки .....	59
3.5. Атомные электростанции.....	60
3.6. Гидроэлектростанции.....	61
3.7. Резервные электростанции .....	64
<b>4. Транспортировка электрической энергии от источников к потребителям.....</b>	<b>66</b>
4.1. Принцип действия синхронного генератора.....	66
4.2. Фазные и линейные напряжения.....	69
4.3. Принцип работы однофазного трансформатора.....	71
4.4. Трехфазные трансформаторы.....	73
4.5. Система передачи электроэнергии .....	74
4.6. Выбор сечения проводов.....	76
4.7. Простейшие защиты электрических сетей.....	78
<b>5. Теплоснабжение сельскохозяйственных предприятий.....</b>	<b>80</b>
5.1. Энергетическое топливо .....	80
5.2. Тепловая энергия .....	82
5.3. Обмен тепловой энергией между телами.....	85
5.4. Тепловое расширение.....	87

5.5. Простейшие отопительные устройства .....	88
5.6. Системы теплоснабжения .....	88
5.7. Отопительные котельные.....	90
5.8. Центральные тепловые пункты.....	92
<b>6. Водоснабжение сельских населённых пунктов.....</b>	<b>95</b>
6.1. Водозаборные сооружения .....	98
6.2. Улучшение качества воды .....	101
6.3. Основные методы очистки воды.....	103
6.4. Водонапорные и регулирующие сооружения.....	106
6.5. Водопроводная сеть.....	108
<b>Список использованных источников .....</b>	<b>109</b>

## ВВЕДЕНИЕ

*Цель изучения дисциплины:* на базе законов и понятий, изучаемых в курсах физики, дать начальные сведения об основах выработки, передачи, распределения, использования электрической, тепловой энергии и водообеспечения в сельской местности.

В соответствии с ФГОС ВПО, формируемыми компетенциями при изучении дисциплины являются: способность к использованию основных законов естественно-научных дисциплин в профессиональной деятельности с применением методов математического анализа и моделирования; способность решать инженерные задачи с использованием основных законов электротехники, а также способность проводить измерения и анализировать их результаты.

Следует учитывать, что понятие «энергия» — это одно из основных свойств материи, мера ее движения, а также способность производить работу. Энергия необходима для удовлетворения потребностей человека, улучшения условий жизни и увеличения продолжительности жизни.

В соответствии с ГОСТ 19431—84 энергетика — это область народного хозяйства, науки и техники, охватывающая энергетические ресурсы, производство, передачу, преобразование, аккумулярование, распределение и потребление различных видов энергии. Под энергетикой понимается любая отрасль деятельности человека, связанная с производством и потреблением энергии. Электроэнергетика — это раздел энергетики, обеспечивающий электрификацию страны на основе рационального расширения производства и использования электрической энергии.

Цель энергетики — обеспечение производства энергии путем преобразования первичной (природной) энергии во вторичную (электрическую, тепловую, механическую, химическую).

От производства до потребления энергия проходит несколько стадий:

- получение и концентрация энергетических ресурсов (добыча каменного, бурого угля, торфа, газа, переработка и обогащение ядерного топлива);
- передача энергетических ресурсов преобразующим установкам (уголь доставляется на электростанцию вагонами, газ — по трубопроводам, мазут — в цистернах);
- преобразование первичной энергии во вторичную (в котельных химическая энергия топлива преобразуется в тепловую, на электростанциях — в электрическую и тепловую);

- передача вторичной энергии потребителям (тепловая энергия по трубопроводам, электрическая — по проводам);
- потребление доставленной энергии в полученном или преобразованном виде (тепловая для обогрева помещений и на технологические нужды, электрическая энергия преобразуется в другие виды энергии). Потребление энергии в различных видах: тепловой, световой, механической, электрической, химической является обязательным условием существования человечества.

В современном мире энергетика является основой всех отраслей промышленности и сельского хозяйства. Во всех развитых странах темпы развития энергетики опережают темпы развития других отраслей.

В то же время энергетика — один из источников неблагоприятного воздействия на окружающую среду и человека. Окружающая среда включает атмосферу, гидросферу, биосферу и литосферу. Из атмосферы энергетика потребляет кислород, а выбрасывает газы, влагу и твердые частицы. В гидросфере идет непрерывное потребление воды, создаются искусственные водохранилища, в реки сбрасываются загрязненная и нагретая вода. В биосферу энергетика выбрасывает токсичные вещества, а из литосферы потребляет ископаемые топлива, при этом изменяется ландшафт. Это вызывает тревогу грамотных людей, так как человечеству грозит глобальная катастрофа при неконтролируемом росте энергопотребления. По этой причине энергетическая политика всех государств должна основываться на повышении эффективности использования энергии и всемерной ее экономии.

В общем случае энергия — это способность тела совершать работу. Если работа производится над телом, то оно приобретает энергию (его энергия повышается), если тело производит энергию, то его энергия снижается. Энергия существует во многих формах: потенциальная, кинетическая, механическая, волновая, электрическая, магнитная, энергия излучения и др.

Чтобы овладеть основами энергетики, необходимо помнить, что это инженерная наука, для изучения которой нужно знать единицы измерения и соотношение физических величин. Все единицы измерения установлены в соответствии с международным соглашением и называются Международной системой единиц (International System) — СИ. Основными величинами в системе СИ являются: масса  $m$  — килограмм; время  $t$  — секунда; длина  $l$  — метр; сила то-

ка  $I$  — ампер (А); температура  $T$  — кельвин (К); количество вещества — моль; сила света  $k\delta$  — кандела. Остальные величины являются производными.

Энергия в системе СИ измеряется в джоулях (Дж). Один джоуль — это работа, совершаемая телом, к которому приложена сила один ньютон на расстоянии 1 м,  $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н}\cdot\text{м}$ . Единицей измерения длины в системе СИ является метр, но в энергетике чаще пользуются мм. Так длина последней лопатки паровой турбины 1 200 мм. Зазор между ротором и статором двигателя 0,5...1,5 мм. Очень мелкие линейные величины измеряют в микрометрах (микронах):  $1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$ . Допустима вибрация подшипников турбин 30 мкм.

Для измерения массы в системе СИ и на практике используют килограмм (кг) и кратные ему величины — граммы и тонны.

Единицей времени в системе СИ является секунда. Секунды используют для анализа быстропротекающих процессов. Минуты и часы используются для описания медленных процессов. Так, для пуска энергоблока тепловой электростанции после ремонта требуется минимум 5 часов. Очень полезно знать, что 1 год = 8 760 часам.

Температура в энергетике измеряется в кельвинах (К) и в градусах Цельсия  $^{\circ}\text{C}$ . Эти два показателя связаны соотношением

$$K = ^{\circ}\text{C} + 273,15,$$

но при изменении температуры  $1^{\circ}\text{C} = 1 \text{ К}$ .

В энергетике чаще пользуются 100-градусной шкалой Цельсия.

Площадь и объем измеряются соответственно в  $\text{м}^2$  и  $\text{м}^3$ . Особо следует сказать о природном газе. Проще всего измерять его в кг, но по историческим причинам его измеряют в  $\text{м}^3$ . Это неудобно, так как в равных объемах при разных давлениях содержится разная масса газа, содержащая разную тепловую энергию. По этой причине количество природного газа измеряют в нормальных кубометрах, т.е. приведенных к нормальным условиям (отсутствие влаги, температура  $0^{\circ}\text{C}$  и давление 1 атм.).

Скорость измеряется в м/с. Так, если скорость течения пара в турбине 50...500 м/с, то интенсивность вибрации измеряется виброскоростью, которую измеряют специальным прибором. Нормальный уровень вибрации турбины 2,8 мм/с, а при возрастании вибрации до 7 мм/с турбина должна быть остановлена.

Частота вращения измеряется числом оборотов в минуту или в секунду. Частота вращения вала турбогенератора 3 000 об/мин или 50 об/с, что соответствует частоте переменного тока 50 Гц.

Сила и вес в системе СИ измеряется в ньютонах (Н), однако на практике еще иногда пользуются килограмм-силой (кг·с):

$$1 \text{ кг}\cdot\text{с} = 9,8 \text{ Н} \approx 10 \text{ Н}.$$

В одном часе 3 600 с, тогда 1 кВт час = 3 600 кДж = 3 600 000 Дж, такие значения неудобно использовать в расчетах, поэтому количество электрической энергии для удобства измеряют в кВт·часах. Количество тепловой энергии, как и любой работы, измеряют в джоулях, но на практике чаще всего теплоту измеряют в килокалориях (ккал), гигакалориях (Гкал), 1 Гкал =  $10^6$  ккал =  $10^9$  кал. Соотношение между некоторыми видами энергий представим в таблице 1 [1].

Таблица 1. Соотношение между измерительными единицами энергии

Единицы	Дж = Н·м	кВт·ч	кгс·м	ккал
1 Дж	1	$2,78 \cdot 10^{-7}$	0,102	$0,239 \cdot 10^{-3}$
1 кВт·ч	$3,6 \cdot 10^6$	1	$3,67 \cdot 10^5$	860
1 кгс·м	9,81	$2,73 \cdot 10^{-6}$	1	$2,34 \cdot 10^{-5}$
1 ккал	$4,19 \cdot 10^3$	$1,163 \cdot 10^{-3}$	427	1

Из таблицы 1 следует, что потребление тепловой энергии

$$1 \text{ Гкал} = 1 \cdot 10^9 \text{ кал} = 1 \cdot 10^6 \text{ ккал},$$

что равносильно  $1163 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 1,163 \text{ МВт}\cdot\text{ч}$ .

Наряду с понятием работа (энергия) энергетики пользуются понятием мощность. Мощность — это работа, совершаемая в единицу времени, в системе СИ мощность измеряют в ваттах ( $1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с}$ ). Мощность в энергетике никогда не измеряют в лошадиных силах, а измеряют в ваттах (Вт), киловаттах (кВт),  $1 \text{ кВт} = 1 \cdot 10^3 \text{ Вт}$ , мегаваттах (МВт),  $1 \text{ МВт} = 10^3 \text{ кВт} = 10^6 \text{ Вт}$ .

Исторически сложилось, что в лошадиных силах измеряют только мощность двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Соотношение между распространенными в энергетике единицами мощности приведены в таблице 2.

Таблица 2. Соотношение между единицами мощности

Единицы мощности	Вт = Дж/с	кВт	л.с.	кгс·м/с
1 Вт	1	$10^{-3}$	$1,36 \cdot 10^{-3}$	0,102
1 кВт	1 000	1	1,36	102
1 л.с.	736	0,736	1	75
1 кгс·м/с	9,81	$9,81 \cdot 10^{-3}$	$1,33 \cdot 10^{-2}$	1



Из таблицы следует, если мощность ДВС автомобиля 100 л.с., то это соответствует мощности 73,6 кВт. Переход от л.с. к кВт в ДВС особенно актуален в связи с распространением гибридных автомобилей. Когда вам требуется включать в работу генератор мощностью 30 кВт, то для его вращения необходим ДВС мощностью по крайней мере 41 л.с.

Нетрудно определить, что если потребление энергии нагревателем для обогрева в течение суток  $W = 1200$  кВт·часов, то средняя мощность нагревателя составит

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{W}{t_{\text{сут}}} = \\
 &= \frac{1\,200 \text{ кВт} \cdot \text{ч}}{24 \text{ ч}} = \frac{1\,200 \cdot 1\,000 \cdot 3\,600 \text{ Вт} \cdot \text{с}}{24 \cdot 3\,600 \text{ с}} = \\
 &= 50\,000 \text{ Вт} = 50 \text{ кВт}
 \end{aligned}$$

Для определения средней мощности потребителя при заданном потреблении электроэнергии в кВт·ч необходимо количество потребленной энергии разделить на число часов работы.

## 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

Электричество — совокупность явлений, связанных с существованием, движением и взаимодействием электрических зарядов.

В обычной жизни электричеством называют электрическую энергию, потребляемую от источников энергии. В качестве источников используются химические, солнечные, геотермальные, электромеханические электростанции. От этих электростанций электрическая энергия по электрическим проводам передается потребителям. У потребителей электроэнергия преобразуется в световую, тепловую, химическую, механическую энергию, необходимую для жизнедеятельности всех живых организмов. Источники электроэнергии, устройства передачи ее и потребители образуют электрическую цепь.

В электрических цепях различают источники электродвижущей силы (ЭДС) и источники тока. В своей практической деятельности мы почти в 100% используем источники ЭДС. ЭДС — это разность электрических зарядов на выводах источника. На одном выводе накапливается избыток электронов, на другом — недостаток. Если соединить между собой выводы источника, то по соединительным проводам будет протекать электрический ток. Можно считать, что ЭДС равна напряжению на выводах источника питания (аккумулятора, трансформатора, генератора) на холостом ходу. Это напряжение можем измерить вольтметром. В высоковольтных установках свыше 1 000 В напряжения измеряют вольтметром через измерительные трансформаторы напряжения. У идеальных источников ЭДС напряжение на выходных зажимах не изменяется при любой нагрузке [2].

Только в сильноточных электрических цепях используются источники тока — это измерительные трансформаторы тока. У идеальных источников тока ток во вторичной обмотке не изменяется при изменении нагрузки. С помощью трансформаторов тока измеряют величины переменных токов. Разновидностью трансформаторов тока являются широко распространенные среди электромонтеров токоизмерительные клещи, но у них невозможно изменить нагрузку, которой является электроизмерительный прибор.

В энергетике и в электронике используют цепи постоянного (не изменяющегося по величине в течение времени) и переменного (изменяющегося по величине в течение времени) тока. Цепи постоянного тока получают питание от аккумуляторов, генераторов постоянного тока, выпрямителей. При протекании постоянного тока по проводам учитывают только их активное сопротивление. На постоянном токе работает почти все электрооборудование автомоби-

лей, тракторов и других транспортных средств. На этих транспортных средствах постоянный ток поступает в бортовую сеть от синхронных генераторов переменного тока, на выходе которых установлены выпрямители.

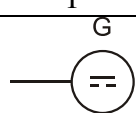
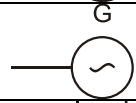

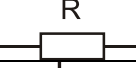

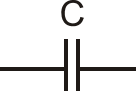
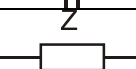
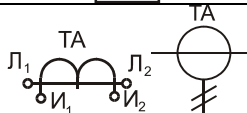
Цепи переменного тока получают питание от трансформаторов, генераторов переменного тока. При расчете цепей переменного тока следует учитывать активное, индуктивное и емкостное сопротивления. Переменный ток используется в быту и во всех видах промышленного и сельскохозяйственного производства.

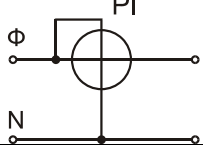
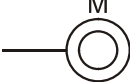


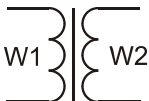

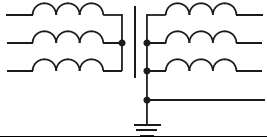



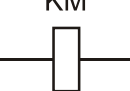



Рисовать даже в масштабе элементы электрических цепей громоздко, а их соединение и взаимное влияние выяснить при виде картинки невозможно. Поэтому каждый элемент электрической цепи изображается условным графическим изображением (своеобразным иероглифом). Из этих изображений «собирается» на чертеже цепь любой сложности, понятная грамотному электрику.

### 1.1. Условные графические изображения

Приведем лишь некоторые из многочисленных элементов, размеры и внешний вид которых зафиксированы в стандартах (табл. 3). Сверху условного графического изображения обозначается их буквенное название. Получаем своеобразную азбуку электрика. Во многих случаях к этой азбуке не требуется делать пояснения.

Таблица 3. Условные графические обозначения

Обозначение	Название
1	2
	генератор постоянного тока
	генератор переменного тока
	аккумулятор, батарейка
	активное сопротивление
	индуктивность; индуктивное сопротивление
	емкость-конденсатор, емкостное сопротивление
	полное сопротивление
	трансформатор тока

1	2
	однофазный счетчик активной энергии
	асинхронный электродвигатель
	осветительная лампа накаливания
	силовой однофазный трансформатор в однолинейном изображении;
	силовой однофазный трансформатор в развернутом изображении
	силовой трехфазный трансформатор в однолинейном виде
	силовой трехфазный трансформатор в развернутом (трехфазном) виде
	предохранитель с плавкой вставкой
	автоматический воздушный выключатель
	силовой контакт магнитного пускателя
	катушка управления магнитным пускателем
	заземление, заземляющее устройство
	разъемное соединение проводников
	неразъемное соединение проводов

## 1.2. Закон Ома

В замкнутой цепи под действием ЭДС источника протекает ток. Сила тока на всех участках неразветвлённой цепи одинакова. Сила тока измеряется в амперах. *Один ампер — это ток, при протекании которого по двум бесконечно длинным проводам, находящимся в вакууме на расстоянии 1 м друг от друга, создается сила  $2 \cdot 10^{-7}$  Ньютонов на каждый метр провода [3].*

ЭДС и напряжения показывают разность электрических зарядов между двумя точками. Напряжения и ЭДС измеряются в вольтах. *Один вольт — это разность потенциалов между концами проводника с током 1 А, сопротивление которого 1 Ом.*

Ток в элементе цепи при постоянной температуре пропорционален ЭДС, под действием которой он протекает. Отношение ЭДС к силе тока называется сопротивлением.

*Сопротивление называется активным, если энергия, выделяемая в нем, безвозвратно переходит в тепловую.*

$$R = \frac{E}{I}, \quad \text{отсюда} \quad I = \frac{E}{R},$$

где  $R$  — сопротивление проводника постоянному току;

$E$  — ЭДС источника;

$I$  — сила тока.

Последняя формула отражает закон Ома для участка цепи. *Ток на участке цепи пропорционален разности потенциалов на концах этого участка (напряжению между концами) и обратно пропорционален сопротивлению участка.*

Сопротивление можно рассматривать как способность элемента цепи препятствовать прохождению тока. Оно зависит от удельного сопротивления материала, из которого изготовлен элемент, его формы и размера. Из физики известно, что для металлических проводников сопротивление вычисляется по формуле

$$R = \frac{\rho l}{s},$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление проводника, Ом·м, в литературе встречается измерение  $\rho$  в Ом·мм<sup>2</sup>/м. Если сечение проводника подставлять в мм<sup>2</sup>, а длину — в м, то сопротивление получим в омах;

$l$  — длина проводника, м;

$s$  — площадь поперечного сечения проводника, м<sup>2</sup>.

Закон Ома применим для всей цепи, по которой протекает ток, при этом в цепи надо учитывать внутреннее сопротивление источника (генератора, аккумулятора)  $R_{ВНУТ}$  и внешнее  $R_{ВНЕШ}$ , это осветительные лампы, облучатели, нагреватели, электродвигатели, соединительные провода.

$$I = \frac{E}{R_{ВНЕШ} + R_{ВНУТ}}.$$

Для участка цепи закон Ома не учитывает внутреннее сопротивление источника, поэтому чаще всего записывают, заменяя ЭДС напряжением (разностью потенциалов) между концами нагрузки (сопротивления), при этом подстрочный индекс у сопротивления опускают

$$I = \frac{U}{R}.$$

### 1.3. Мощность и работа электрического тока

Электроны, движущиеся в проводнике под действием разности потенциалов, сталкиваются с его атомами и передают им свою энергию. В результате элемент нагревается. Скорость, с которой электрическая энергия расходуется на нагревание проводника, называется активной мощностью и измеряется в ваттах, Вт = В·А. Один ватт — это мощность, которая выделяется в проводнике, по которому протекает ток 1 А при разности потенциалов 1 В. По закону Ома  $U = I R$  или  $I = U/R$ , поэтому формула мощности представляется в двух видах:

$$P = UI = IRI = I^2R,$$

$$P = UI = U(U/R) = U^2/R,$$

где  $U$  — разность потенциалов по концам проводника.

Первой формулой удобно пользоваться при последовательном включении сопротивлений, а второй — при параллельном.

Произведение мощности на время дает работу. Работа, совершаемая электрическим током, измеряется в Вт·часах (кВт·часах). По закону Джоуля-Ленца при протекании тока  $I$  по проводнику она равна [3]

$$W = I^2 R t,$$

где  $t$  — время протекания тока.

При изменяющемся токе энергия будет изменяться, а также ее количество. Если представить изменение тока в виде ступенек, то общее количество электроэнергии будет представлять собой площадь ступенчатой фигуры (рис. 1.1):

$$W = \sum_{i=1}^{i=n} I_i^2 R t_i = R \sum_{i=1}^{i=n} I_i^2 t_i ,$$

где  $I_i$  — величина тока на  $i$ -ой ступени;  
 $t_i$  — время протекания тока  $I_i$ .

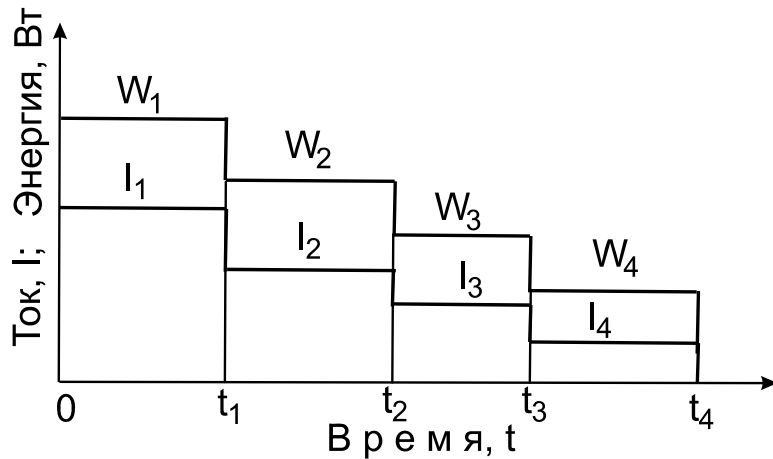


Рис. 1.1. Ступенчатый график изменения тока и энергии во времени

По оси ординат в одном масштабе откладываем ток, а в другом масштабе — энергию.

При бесконечно малых промежутках времени  $t_i$  получим при известном законе изменения тока во времени от 0 до  $T$ :

$$W = R \int_0^T I^2(t) dt.$$

Именно такое количество электроэнергии или теплоты тратится на нагрев проводника, по которому протекает ток. Закон Джоуля-Ленца гласит: *количество теплоты (электроэнергии), выделяемое проводником с током, равно произведению квадрата силы тока, активного сопротивления проводника и времени протекания тока по проводнику.*

Работу, которую совершает электрическая энергия в квартире, отражает счетчик активной энергии. Счетчик измеряет количество электроэнергии в киловатт-часах. При неизменном напряжении счетчик вычисляет энергию в соответствии с формулой

$$W = R \int_0^T I_{\text{АКТ}}^2(t) dt ,$$

где  $I_{\text{АКТ}}$  — активная составляющая тока, выполняющая полезную работу.

Электрическая энергия обеспечивает комфортные условия жизни путем преобразования в световую, тепловую, механическую энергию.

## 1.4. Виды соединения резисторов

Резистор — это элемент с заданной величиной сопротивления. В нашей жизни встречается чаще всего параллельное, реже последовательное и еще реже — смешанное соединение резисторов.

При параллельном соединении концы резисторов соединяются в узлах А и В (рис. 1.2). Участки цепи, соединяющие два узла, называются ветвями. Как видно из рис. 1.2. между точками А и В проложено две ветви, по которым протекают токи  $I_1$  и  $I_2$ . Нетрудно видеть, что при установившемся режиме количество электричества, притекающего к узлу, равно количеству электричества, вытекающего из узла.

$$I_1 + I_2 = I_{\text{ОБЩ}}, \quad (1)$$

или  $\Sigma I = 0$ .

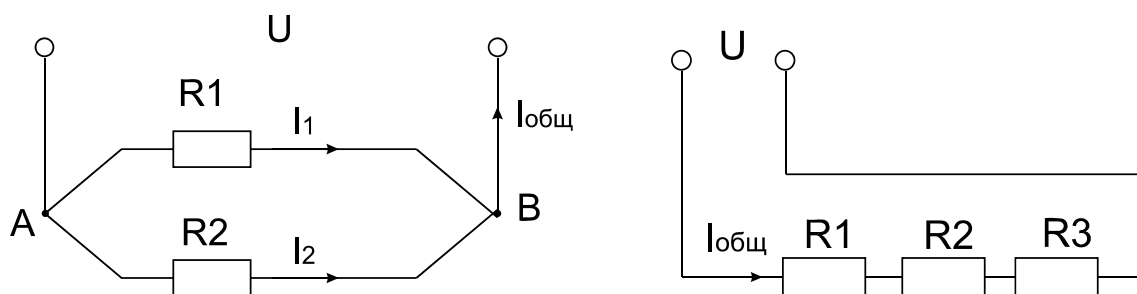


Рис. 1.2. Параллельное и последовательное соединение сопротивлений

Если обозначить направление тока к узлу с плюсом, а направление тока, вытекающего из узла, с минусом, то получим

$$I_1 + I_2 - I_{\text{ОБЩ}} = 0.$$

Алгебраическая сумма токов, сходящихся в любом узле схемы, равна нулю — это первый закон Кирхгофа.

Можно сформулировать этот закон в другой форме: сумма подтекающих к любому узлу токов равна сумме утекающих от узла токов [3].

Выведем формулу для нахождения общего сопротивления двух параллельно включенных резисторов  $R_{\text{ОБЩ}}$ .

Тогда 
$$U = I_{\text{ОБЩ}} R_{\text{ОБЩ}}.$$

При параллельном соединении к обоим резисторам подводится одинаковое напряжение, тогда

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U}{R_2}; \quad I_{\text{ОБЩ}} = \frac{U}{R_{\text{ОБЩ}}}.$$



Подставим значения токов в уравнение (1)

$$\frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} = \frac{U}{R_{\text{ОБЩ}}}.$$

После сокращения на  $U$  получим

$$\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_{\text{ОБЩ}}} = g_{\text{ОБЩ}}.$$

Величина, обратная сопротивлению, называется проводимостью ( $g_{\text{ОБЩ}}$ ). Поэтому при параллельном соединении сопротивлений складываются проводимости, это понятие более подробно рассмотрено в курсе теоретических основ электротехники (ТОЭ).

Отсюда находим сопротивление, эквивалентное двум параллельно включенным  $R_1$  и  $R_2$ , то есть два сопротивления можем заменить одним

$$R_{\text{ОБЩ}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (2)$$

Общее сопротивление всегда меньше меньшего из двух сопротивлений. Если параллельно включены три сопротивления  $R_1, R_2, R_3$  то сначала можно найти общее для двух сопротивлений  $R_{12}$ , а затем для параллельно включенных резисторов  $R_{12}$  и  $R_3$  находят общее для трех сопротивлений  $R_{123}$ . Если параллельно соединены  $n$  равных между собой сопротивлений  $R$ , то

$$R_{\text{ОБЩ}} = R/n.$$

При последовательном соединении через резисторы протекает один и тот же ток, тогда на каждом сопротивлении напряжение составит

$$U_1 = I R_1; \quad U_2 = I R_2; \quad U_3 = I R_3.$$

В результате сложения левых частей уравнений получим

$$U_1 + U_2 + U_3 = U_{\text{CD}} = E. \quad (3)$$

На основании полученной формулы делаем вывод: в замкнутой электрической цепи ЭДС или сумма ЭДС равна алгебраической сумме напряжений на отдельных участках цепи — это второй закон Кирхгофа.

Напряжение источника или ЭДС равно

$$U_{\text{CD}} = I R_{\text{ОБЩ}}.$$

После подстановки значений напряжений получим

$$I R_1 + I R_2 + I R_3 = I R_{\text{ОБЩ}}.$$

После сокращения на ток получаем

$$R_1 + R_2 + R_3 = R_{\text{ОБЩ}}. \quad (4)$$

Вывод: При последовательном включении сопротивлений общее сопротивление равно сумме сопротивлений составляющих элементов.

Последовательно включаются, например, два проводника с сопротивлениями  $R_1$  и  $R_3$ , и нагрузка  $R_2$  (см. рис. 1.2).

Для нахождения общего сопротивления смешанно включенных сопротивлений сначала находят эквивалентное сопротивление параллельно включенных, а затем складывают с последовательными сопротивлениями.

### 1.5. Сопротивления элементов сети переменному току

При протекании постоянного тока вокруг проводника существует постоянное магнитное поле, которое можно обнаружить, например, компасом. Стрелка компаса располагается вдоль силовых линий магнитного поля. При протекании переменного тока по проводнику вокруг проводника появляется переменное магнитное поле. Это магнитное поле влияет на протекание переменного тока, появляется реактивное сопротивление. Сопротивление называется реактивным, если энергия, выделяемая в нем в одну часть периода, полностью возвращается в цепь в другую часть периода переменного тока.

Рассмотрим контур из двух соединенных проводников. При перемещении контура в магнитном поле в каждом проводнике будет наводиться ЭДС. Величина ЭДС известна из курса физики:

$$e = B L v, \quad (5)$$

где  $B$  — индукция магнитного потока, в котором движется проводник. Индукция — это плотность магнитного потока.

Другими словами, величина магнитного потока, приходящаяся на единицу площади поперечного сечения, индукция измеряется в теслах  $T_l$ ;

$L$  — активная длина проводника, та часть проводника, которая пересекается магнитным полем;

$v$  — скорость перемещения проводника в магнитном поле. Скорость определяется расстоянием и временем.

За небольшой промежуток времени  $\Delta t$  проводник переместится на  $\Delta b$ , тогда  $v = \Delta b / \Delta t$  или за бесконечно малый промежуток времени  $v = db/dt$ . Подставим значение скорости в формулу (5) и преобразуем ее с учетом того, что произведение длины проводника на перемещение дает площадь магнитного потока, которую пересекает проводник.

Кроме этого произведение индукции на площадь пересеченного магнитного потока дает нам изменение магнитного потока

$$e = B L v = B L \frac{\Delta b}{\Delta t} = B \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t},$$

получаем 
$$e = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

За бесконечно малый промежуток времени ЭДС наведенная на концах проводника пропорциональна скорости изменения магнитного потока

$$e = \frac{d\Phi}{dt}.$$

Если в проводнике, пересекающем магнитное поле, наводится ЭДС, то, и наоборот, в неподвижном проводнике при пересечении его магнитным потоком наводится ЭДС. Говорят, что в проводнике индуцируется ЭДС. Направление ЭДС в проводнике определяется по правилу правой руки.

При протекании переменного тока по проводнику вокруг него создается магнитное поле, которое пересекает свой проводник и наводит в нем ЭДС самоиндукции. Значит, *ЭДС самоиндукции — эта такая ЭДС, которая возникает в проводнике от собственного переменного тока.* Направление ЭДС получим из закона Ленца, по которому ЭДС, индуцируемая в проводнике, должна иметь такое направление, чтобы магнитный поток, создаваемый ЭДС и током самоиндукции, имел направление, противоположное основному потоку.

В электрических сетях формы тока и напряжения задаются генераторами на электростанциях. В генераторах обмотки, в которых наводится напряжение, укладываются в пазы статора так, что мгновенные значения токов и напряжений изменяются по синусоидам:

$$i = I_m \sin \alpha, \quad u = U_m \sin \alpha$$

или 
$$i = I_m \sin \omega t, \quad u = U_m \sin \omega t,$$

где  $\omega$  — угловая скорость поворота ротора турбогенератора в радианах в секунду (окружность составляет  $2\pi$  радиан);

$t$  — текущее время.

Угол  $\alpha$  изменяется в пределах от 0 до  $360^\circ$  или от 0 до  $2\pi$  радиан. Этот угол, характеризующий стадию синусоидальной величины, называется фазовым углом, или фазой. Мгновенное значение синусоидальной величины зависит от угла между моментом перехода синусоиды через нулевое значение в сторону возрастания до момента измерения.

Если по витку пропускать синусоидальный переменный ток и фазу отсчитывать в радианах, то мгновенное значение тока равно

$$i = I_m \sin \omega t,$$

где  $I_m$  — максимальное (амплитудное) значение тока в витке;

Этот ток создает переменный магнитный поток, совпадающий с током

$$\Phi = \Phi_{m1} \sin \omega t,$$

где  $\Phi_{m1}$  — максимальное (амплитудное) значение магнитного потока одного витка, Вб.

Рассмотрим подключение катушки с большим количеством витков  $w$  (соленоида) к источнику переменного напряжения (рис. 1.3).

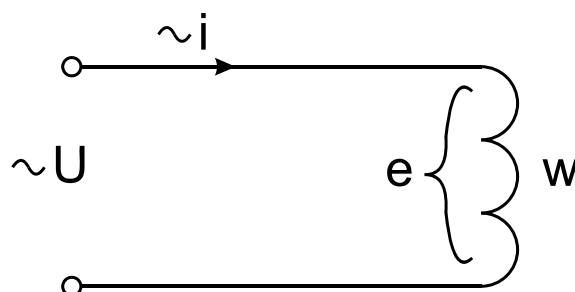


Рисунок 1.3. Подключение катушки к источнику переменного напряжения

В катушке будет протекать переменный ток, который создает суммарный переменный магнитный поток [3].

$$\Phi = \Phi_1 w \sin \omega t, \quad (6)$$

где  $\Phi_1$  — магнитный поток одного витка;  
 $w$  — число витков катушки.

Произведение  $\Phi_1 w = \psi$  называется потокосцеплением катушки. Если катушка не имеет ферромагнитного сердечника, то потокосцепление пропорционально силе тока в катушке

$$\Phi_1 w = \psi = L I_m,$$

где  $L$  — коэффициент пропорциональности, называемый индуктивностью катушки.

Тогда формулу (6) можем переписать

$$\Phi = L I_m \sin \omega t.$$

Индуктивность не зависит от протекающего тока катушки и вычисляется по формуле

$$L = \mu_0 \mu n^2 V,$$

где  $\mu_0$  — абсолютная магнитная проницаемость,  $\mu_0 = 4 \pi 10^{-7}$  Гн/м;

$\mu$  — относительная магнитная проницаемость;  
 $n$  — количество витков, приходящееся на единицу длины катушки (зависит от диаметра провода катушки);  
 $V$  — объем, занимаемый витками катушки.

Приведенная формула показывает, что индуктивность катушки зависит от числа витков, сечения провода, габаритов, другими словами, от параметров катушки.

В катушке будет наводиться ЭДС самоиндукции от изменения собственного магнитного потока. Эта ЭДС уравнивает приложенное напряжение. По второму закону Кирхгофа, в любой момент времени  $u + e = 0$ .

Отсюда для мгновенных значений  $u = -e$ . В любой момент времени напряжение, приложенное к катушке, уравнивается наведенной в ней ЭДС.

$$-e = w \frac{d\Phi}{dt} = L \frac{di}{dt}.$$

Отсюда  $e = -L \frac{di}{dt}$ .

Найдем производную тока

$$e = -L \frac{d(I_m \sin \omega t)}{dt} = -L \omega I_m \cos \omega t.$$

Тогда  $u = +L \omega I_m \cos \omega t$ .

С использованием формул приведения получаем

$$u = +L \omega I_m \cos \omega t = L \omega I_m \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

На катушке индуктивности напряжение опережает ток на  $90^\circ$  или *ток через индуктивность отстает от напряжения на  $90^\circ$* . Нетрудно видеть, чтобы размерности левой и правой частей совпадали, необходимо, чтобы  $L\omega$  имела размерность В/А, а это Ом и обозначается  $X_L$  ( $X_L = \omega L$  — индуктивное сопротивление). Индуктивное сопротивление зависит от частоты тока и от индуктивности. С увеличением частоты тока, протекающего по проводнику, индуктивное сопротивление возрастает.

Отставание тока, изменяющегося по синусоиде, от напряжения, изменяющегося по косинусоиде, ясно видно из графиков (рис. 1.4).

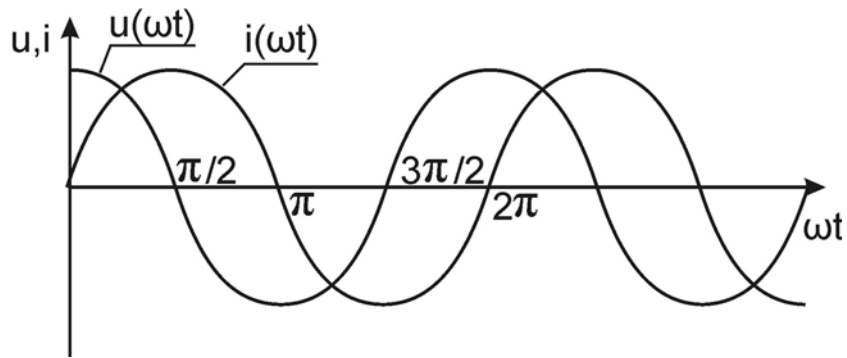


Рис. 1.4. Синусоиды тока и напряжения

Изобразить переменный ток, переменное напряжение синусоидами громоздко. Поэтому синусоиду заменяют вектором. Для этого изобразим синусоиду в функции угла поворота ротора генератора  $\alpha = \omega t$ . (рис. 1.5). Все турбогенераторы электростанций России вращаются с одинаковой частотой 50 об/с, что соответствует 50 периодам изменения синусоиды напряжения в секунду.

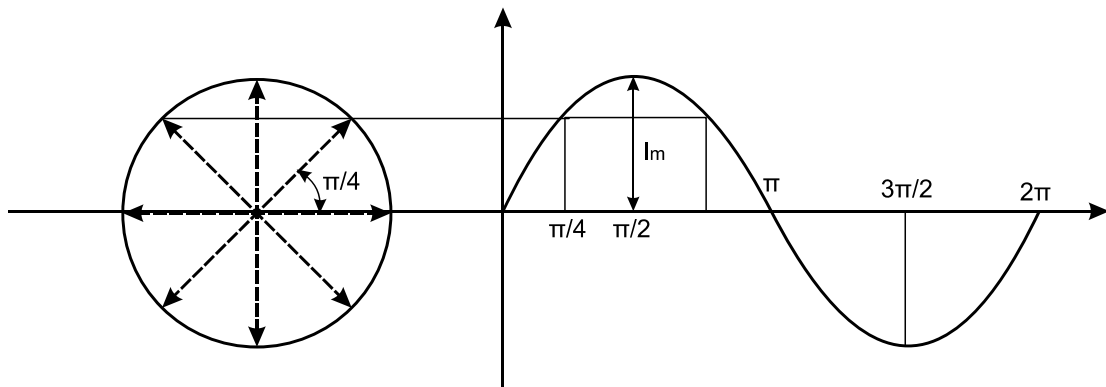


Рис. 1.5. Замена синусоиды вектором

Когда  $\omega t = 0$ , то вектор, равный амплитуде синусоиды, расположим на комплексной плоскости горизонтально, направленный вправо. Мгновенные значения напряжений в любой момент времени будем определять, проецируя вектор на вертикальную ось (ордината вектора). Тогда мгновенное значение синусоидальной величины через  $45^\circ$  (угол  $45^\circ$  соответствует  $\pi/4$ ) будет равно  $ab$ . Но при повороте вектора на  $45^\circ$  мгновенное значение (ордината вектора) также равно  $ab$ . При повороте вектора на  $90^\circ$  мгновенное значение равно амплитуде, то же самое отражается на синусоиде. Значит, любую синусоидальную величину можно заменить вращающимся вектором с частотой  $\omega$  против часовой стрелки.

Размерность угловой частоты

$$\omega = 360^\circ/T,$$

где  $T$  — период колебания или полный цикл изменения мгновенных значений тока, напряжения и любой синусоидальной величины  $T = 1/f$ ;

$f$  — частота тока, Гц.

Угловую частоту выражают в радианах, 1 радиан =  $57^\circ 17'$ , тогда окружность  $360^\circ = 2\pi$  рад  $\approx 6,28$  рад.

$\omega = 2\pi f$ ;  $\omega = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314$  рад/с = 314 1/с. — это синхронная частота вращения ротора генератора и магнитного поля, создаваемого ротором. С такой частотой изменяется мгновенное значение синусоиды тока или напряжения в сети.

Рассмотрим электрическую цепь, в которой к источнику напряжения  $U$  подключены активное сопротивление и катушка индуктивности (рис. 1.6).

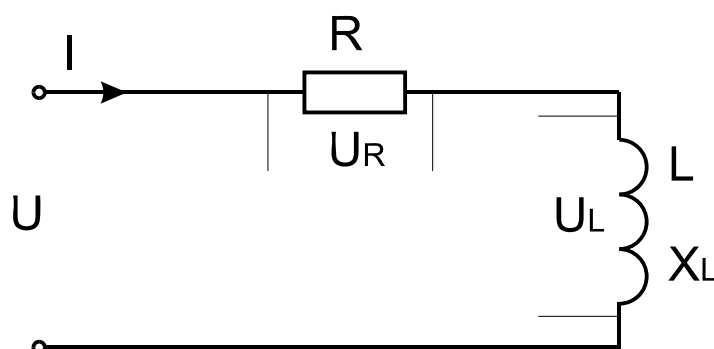


Рис. 1.6. Подключение к источнику питания активного и индуктивного сопротивлений

Вектор тока направим горизонтально. В этом же направлении расположится вектор падения напряжения на активном сопротивлении  $\underline{U}_R$ . Индуктивный ток отстает от напряжения  $\underline{U}_L$  на  $90^\circ$  (вращение векторов против часовой стрелки). Напряжение источника  $\underline{U}_{ИСТ}$  получим в результате сложения векторов  $\underline{U}_R$  и  $\underline{U}_L$  (рис. 1.7).

$$\underline{U}_{ИСТ} = \underline{U}_R + \underline{U}_L.$$

Полученная диаграмма показывает, что в рассматриваемой цепи, содержащей активное сопротивление, с катушкой индуктивности ток отстает от напряжения источника на угол  $\varphi$ .

На векторной диаграмме, если

$$\underline{U}_R = \underline{I} R,$$

то

$$\underline{U}_L = \underline{I} X_L.$$

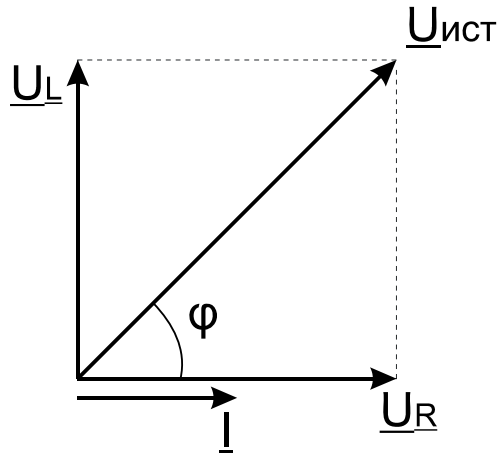


Рис. 1.7. Векторы напряжений на активном и индуктивном сопротивлениях

Индуктивность катушки, находящейся в воздухе, является величиной постоянной и определяется конструкцией (числом витков, размерами катушки), а индуктивное сопротивление зависит от частоты тока и находится по выражению

$$X_L = 2 \pi f L = \omega L .$$

Угол  $\varphi$  (см. рис. 1.7) зависит от соотношения индуктивного и активного сопротивлений (находим из треугольника напряжений):

$$\varphi = \arctg \frac{U_L}{U_R} = \arctg \frac{X_L}{R} .$$

Кроме индуктивного сопротивления в электрических цепях следует учитывать другое реактивное сопротивление — емкостное сопротивление, величина которого зависит от частоты и величины емкости:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2 \pi f C} .$$

С увеличением частоты емкостное сопротивление конденсатора переменному току снижается. В отличие от индуктивности, ток, протекающий через емкость, опережает напряжение. Обкладки конденсатора перезаряжаются каждый полупериод переменного напряжения. Емкостные сопротивления в обыденной электротехнике встречаются сравнительно редко, поэтому в этом пособии не рассматриваются.

Но, следует иметь в виду, если к конденсатору подведено постоянное напряжение, например, от аккумулятора, то через небольшой промежуток времени конденсатор зарядится до этого напряжения. После заряда ток через конденсатор не протекает.



## 1.6. Соотношение сопротивлений и мощностей на переменном токе

На переменном токе следует учитывать не только активное сопротивление проводников, но и реактивное (емкостное или чаще индуктивное). Из векторной диаграммы напряжений на активном и индуктивном сопротивлениях (см. рис. 1.7) ясно, что векторы  $\underline{U}_R$  и  $\underline{U}_L$  расположены под углом  $90^\circ$  друг относительно друга, а три вектора  $\underline{U}_R$ ,  $\underline{U}_L$  и  $\underline{U}_{ИСТ}$  образуют прямоугольный треугольник.

Угол  $\varphi$  показывает, насколько ток в сопротивлении  $Z$  отстает от напряжения. Величина  $\cos \varphi$  называется *коэффициентом мощности*. Длины отрезков этого треугольника разделим на ток  $I$ , получим сопротивления  $R$ ,  $X_L$  и  $Z$ , представляющие стороны также прямоугольного треугольника (рис. 1,8), из него получаем

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2},$$

где  $Z$  — полное сопротивление участка сети переменному току.

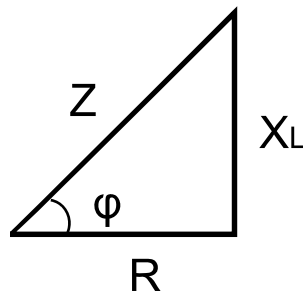


Рис. 1.8. Треугольник сопротивлений

Если известно активное сопротивление и угол  $\varphi$ , то  $Z = R/\cos \varphi$ . В комплексной форме соотношение сопротивлений записывается

$$Z = R + jX.$$

Активное сопротивление на переменном токе практически по величине совпадает с сопротивлением на постоянном токе, поэтому его можно измерить омметром. А полное сопротивление переменному току можно измерить, измеряя величины напряжения и тока, а затем вычислить по закону Ома

$$Z = U_{ПЕР}/I_{ПЕР}.$$

Переменный ток на участке сети чаще всего отстает от приложенного напряжения (см. рис. 1.8), так как преобладают активные и индуктивные сопротивления.

Для нахождения общего сопротивления при последовательном включении двух сопротивлений на переменном токе необходимо складывать отдельно активные и отдельно реактивные сопротивления. При сложении двух последовательно включенных сопротивлений

$$Z_1 = R_1 + j X_1 \quad \text{и} \quad Z_2 = R_2 + j X_2$$

получим  $Z_{OB} = (R_1 + R_2) + j (X_1 + X_2)$ .

Это соответствует удлинению катетов (см. рис. 1.8) и модуль полного сопротивления вычисляется по формуле

$$Z_{OB} = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2}.$$

Аргумент полного сопротивления определяется из выражении [4]

$$\varphi_{OB} = \arctg\left(\frac{X_1 + X_2}{R_1 + R_2}\right).$$

Для нахождения общего сопротивления при параллельном включении двух сопротивлений на переменном токе необходимо складывать их проводимости  $Y$ . Это отражено при параллельном включении активных сопротивлений, если в формуле (2) заменим активные сопротивления на полные:

$$\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} = \frac{1}{Z_{OБЩ}} = Y_{OБЩ},$$

отсюда  $\frac{1}{Y_{OБЩ}} = Z_{OБЩ} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}$ .

Построим векторную диаграмму напряжения  $\underline{U}$  и тока  $\underline{I}$ . Разложим вектор тока на активную составляющую  $\underline{I}_a$  и реактивную составляющую  $\underline{I}_p$ , получим треугольник токов (рис. 1.9).

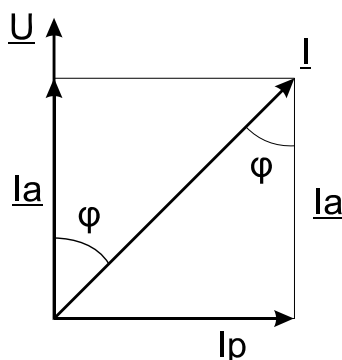


Рис. 1.9. Разложение тока на составляющие

Между активной составляющей и полным током на участке угол  $\varphi$ . Умножим каждую сторону треугольника токов на напряжение  $U$ , тогда стороны составят (рис. 1.10):

$$IU = S; I_a U = P; I_p U = Q ,$$

где  $S$  — полная мощность;

$P$  — активная мощность;

$Q$  — реактивная мощность.

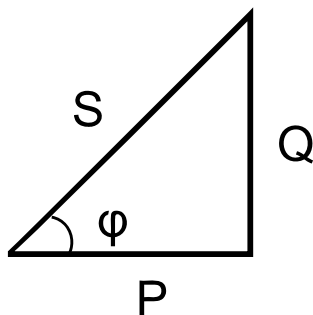


Рис. 1.10. Соотношение мощностей

Из треугольника мощностей получаем вывод, что коэффициент мощности  $\cos \varphi = P/S$  показывает, какую долю от полной мощности составляет активная мощность. На любом участке сети соблюдается соотношение

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad P = S \cos \varphi, \quad Q = S \sin \varphi .$$

Выпишем основные полученные выводы электротехники в виде формул и определений.

#### 1. Закон Ома

– для участка цепи  $I = \frac{U}{R}$ ;

– для полной цепи постоянного тока  $I = \frac{E}{R_{\text{ВНУТ}} + R_{\text{ВНЕШ}}}$ ;

– для полной цепи переменного тока  $I = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_{\text{ВНУТ}} + \underline{Z}_{\text{ВНЕШ}}}$ .

2. Первый закон Кирхгофа  $\sum I_{\text{УЗЛА}} = 0$  .

3. Второй закон Кирхгофа  $\sum_{i=1}^{i=n} E_{\text{КОНТУРА}} + \sum U_{\text{КОНТУРА}} = 0$  .

4. При параллельном включении двух сопротивлений:

– для постоянного тока  $R_{ПАР} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ ;

– для переменного тока  $\underline{Z}_{ПАР} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}$ .

5. При последовательном включении сопротивлений:

– для постоянного тока

$$R_{ПОСЛ} = R_1 + R_2 + \dots + R_n;$$

– для переменного тока

$$\underline{Z}_{ПОСЛ} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \dots + \underline{Z}_n,$$

где  $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2$  — комплексные сопротивления

$$Z_1 = R_1 + jX_L; \quad Z_n = R_n + jX_n.$$

6. При протекании тока в проводнике теряется мощность на нагрев, она измеряется в Вт, кВт, МВт:

$$P = UI = IRI = I^2 R.$$

7. Реактивная мощность, рассеиваемая на реактивном (индуктивном или емкостном) сопротивлении, измеряется в вар, квар, Мвар:

$$Q_L = I^2 X_L, \quad Q_C = I^2 X_C.$$

8. Работа, совершаемая электрическим током, измеряется в Вт·ч, кВт·ч, МВт·ч:

$$A = I^2 Rt.$$

9. Переменный ток формирует переменное магнитное поле, под действием которого в проводниках возникает ЭДС самоиндукции:

$$e = -W \frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{di}{dt}.$$

10. На активном сопротивлении вектор тока совпадает с вектором напряжения, приложенного к сопротивлению.

11. На индуктивности вектор (или синусоида) тока отстает от вектора (или синусоиды) напряжения на угол 90 градусов ( $\pi/4$ ).

12. На емкости вектор (или синусоида) тока опережает напряжение на угол 90 градусов ( $\pi/4$ ).

### *Контрольные вопросы*

1. Что такое удельное сопротивление проводника?
2. От каких величин зависит сопротивление проводника?
3. Как вычислить сопротивление четырех разных по величине сопротивлений, включенных параллельно?
4. Что представляет собой контур тока, протекающего по лампе в квартирной электропроводке?
5. Что представляет собой треугольник сопротивлений?
6. От чего зависит индуктивное сопротивление проводника на переменном токе?
7. Как соединяются лампы в квартире?
8. Вычислить общее сопротивление двух ламп разной мощности.
9. Что представляет собой треугольник сопротивлений?
10. Изобразить треугольник токов с переменным напряжением.
11. Что представляет собой треугольник мощностей?
12. Что показывает коэффициент мощности?

## 2. ПОТРЕБИТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Потребитель электрической энергии — это предприятие, организация, территориально обособленный цех, строительная площадка, квартира, у которых приемники электрической энергии присоединены к электрической сети и используют электрическую энергию. К потребителям рекомендуется подводить от электрической сети определенный уровень рабочего напряжения, которое называют номинальным.

### 2.1. Номинальные напряжения

Номинальным напряжением называется такое, на которое электроустановка рассчитана на заводе-изготовителе для работы в течение всего срока службы. Так, срок службы ламп накаливания составляет 1 000 часов. Если напряжение на лампе превышает номинальное, то ее срок службы резко сокращается. Допустимое отклонение напряжения на всех потребителях по стандарту допускается  $\pm 10\%$ . Это значит, что к однофазным приемникам допускается подводить напряжение от 210 до 230 В. Для электродвигателей допустимый диапазон изменения напряжения на выводах должен быть в пределах 360...400 В. Такое напряжение у потребителей должны обеспечивать организации, в распоряжении которых находятся электрические сети. Под действием подведенного напряжения через нагрузку протекает электрический ток, который совершает работу, необходимую потребителю.

Номинальное напряжение источников [7] обычно на 5% больше номинального напряжения линий электропередачи и электроприемников (табл. 4).

Таблица 4. Номинальные напряжения систем электроснабжения и приемников трехфазного переменного тока до 1 000 В по ГОСТ 21128—83

Вид тока	Источников, В	Сетей и приёмников, В
Однофазный	6; 12; 28,5; 42; 62; 115; 230	6; 12; 27; 40; 60; 110; 220
Трёхфазный	42; 62; 230; 400; 690	40; 60; 220; 380; 660

Наибольшее количество электроприемников получают электроэнергию по сети 380/220 В. Сеть 380/220 В включает низковольтную обмотку трансформатора 10(6)/0,4 кВ, щит низкого напряжения на стороне 0,4 кВ трансформатора, линии электропередачи 380 В, отходящие от трансформаторного пункта. К линиям элек-

тропередачи 380/220 В подключаются распределительные (вводные) щиты в зданиях потребителей, а затем по внутренним сетям зданий электроэнергия поступает к потребителям.

По надежности электроснабжения потребители делятся на три категории [5]. К первой категории относятся потребители, перерыв питания которых создает угрозу для жизни людей или расстройство непрерывных производств. Перерыв электроснабжения таких потребителей допускается на время автоматического включения резерва, что составляет несколько секунд. Если потребитель не терпит перерыва электроснабжения даже доли секунды, тогда должны использоваться источники бесперебойного электроснабжения (ИБП). В качестве ИБП обычно используют аккумуляторные батареи, которые автоматически вводятся в работу при исчезновении основного питания.

Ко второй категории относятся потребители, перерыв электроснабжения которых допускается на время ручного переключения питания на другой источник. Это время составляет обычно не более одного часа.

Питание потребителей первой и второй категории должно осуществляться по крайней мере от двух независимых друг от друга источников питания: двух трансформаторов и двух линий электропередачи.

К третьей категории относятся все остальные потребители, перерыв электроснабжения которых допускается на время не более 24 часов.

## **2.2. Измерения электрических величин**

Любой потребитель электроэнергии представляет собой сопротивление. Через это сопротивление протекает ток, величину которого необходимо контролировать, чтобы исключить преждевременный выход из строя или выявить причину дефекта. Силу тока измеряют амперметрами. В эксплуатации электроустановок до 1 000 В чаще всего переменный ток измеряют переносным универсальным прибором — токоизмерительными клещами. Клещи содержат разъемный магнитопровод, который охватывает проводник с измеряемым током. На этом же магнитопроводе размещена обмотка, к которой подключен измерительный стрелочный или цифровой прибор, шкала которого проградуирована в амперах. Стрелка прибора отклоняется в зависимости от величины протекающего через прибор тока. Для измерения различных величин токов токоизмерительные клещи имеют переключатель пределов измерения, которым изменяется цена деления шкалы измерительного прибора.

Для потребителей электрической энергии важно знать уровень подводимого напряжения. Напряжение на выводах потребителя или между двумя проводниками измеряют вольтметрами. Вольтметр совмещен с токоизмерительными клещами, для измерения напряжения необходимо измерительный прибор переключить на соответствующий предел измерения напряжения (300 или 500 В) и два изолированных проводника, вставленных в гнезда токоизмерительных клещей, подключить к точкам, между которыми измеряется напряжение.

В сети с напряжением 12 В желательно использовать вольтметр с пределом измерения 15-20 В. Вольтметры подключаются к сопротивлениям нагрузки параллельно. Чтобы вольтметры не вносили искажение в измерение напряжения, их собственное сопротивление должно быть намного больше сопротивления нагрузки, на которой измеряется напряжение. При этом ток, потребляемый вольтметром, намного меньше тока нагрузки, и в процессе измерения напряжение на нагрузке практически не изменяется.

Амперметры включают последовательно с сопротивлением, ток которого измеряется. Для снижения влияния самого амперметра на силу тока сопротивление амперметра делают очень малым. Переменный ток любого потребителя измеряется непосредственно амперметром или при больших токах амперметром, подключаемым через трансформатор тока (рис. 2.1).

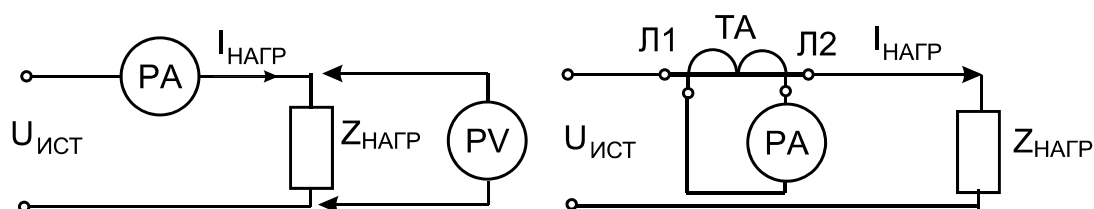


Рис. 2.1. Измерение тока и напряжения на нагрузке

Для таких измерений амперметр или трансформатор тока включается в рассечку силовой или осветительной сети, последовательно с нагрузкой. Трансформатор тока преобразует ток, протекающий по силовой сети, в пропорциональный ток измерительного амперметра. У многих амперметров номинальный ток составляет 5 А.

Третий вид измерения, который выполняют у всех потребителей, — это измерение потребляемой активной энергии. Измерение активной энергии осуществляется счетчиками активной энергии. Для измерения потребляемой энергии в токовую цепь счетчика заводится величина тока потребителя. Ток протекает по токовой обмотке  $W_{ТОК}$ . Напряжение потребителя подводится к обмотке напряжения  $W_{НАПР}$  (рис. 2.2).



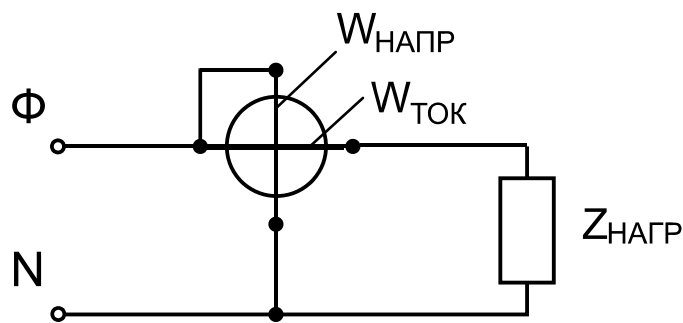


Рис. 2.2. Подключение однофазного счетчика активной энергии

В однофазном счетчике осуществляется непрерывно умножение напряжения на ток, на коэффициент мощности потребителя и на время измерения. Энергия, фиксируемая счетчиком, измеряется в кВт·часах.

Однофазный счетчик измеряет потребляемую активную энергию в соответствии с формулой

$$W^{(1)} = (N_2 - N_1),$$

где  $N_2$  — конечные показания счетчика, например, в конце месяца;  $N_1$  — начальные показания счетчика в начале месяца.

Счетчик активной энергии изготовлен таким образом, что он выполняет непрерывное сложение мощностей

$$W^{(1)} = \sum_{i=0}^{i=n} U_{\phi_i} I_{\phi_i} \cos \varphi_i t_i ,$$

где  $U_{\phi_i}$  — напряжение, подведенное к обмотке напряжения счетчика за короткий промежуток времени;

$I_{\phi_i}$  — ток, проходящий через обмотку счетчика за то же промежуток времени;

$\cos \varphi_i$  — средний коэффициент мощности за промежуток времени 1 час.

Обычно бытовые потребители фиксируют разность показаний счетчика в конце и в начале за месяц ( $N_2 - N_1$ ) в кВт·часах. В кВт·часах измеряется работа, поэтому потребитель расплачивается за работу, выполненную электроэнергией (нагрев спирали лампы накаливания, вращение электродвигателя компрессора холодильника и др.).

Трехфазные счетчики имеют три измерительных механизма. Они могут включаться без трансформаторов тока или через трансформаторы тока в зависимости от величины тока в контролируемой сети. В настоящее время выпускаются трехфазные

счетчики прямого включения без трансформаторов тока на токи до 100 А. Показания трех измерительных механизмов внутри счетчика суммируются. Так при неизменной нагрузке (нагреватель) за время  $t_{РАБ}$  будет потребляться

$$W^{(3)} = (N_2 - N_1) = \\ = (U_{\phi A} I_{\phi A} \cos \varphi_A + U_{\phi B} I_{\phi B} \cos \varphi_B + U_{\phi C} I_{\phi C} \cos \varphi_C) t_{РАБ}.$$

Индексы А, В и С указывают принадлежность рассматриваемой величины к фазе в трехфазной системе.

Отсюда ясно, как вычислить потребляемую мощность и активную составляющую тока. Проходящая через счетчик электрическая энергия совершает работу, превращаясь в световую, тепловую, механическую энергии. Энергия, проходящая через счетчик в единицу времени, называется мощностью. Поэтому для определения мощности, проходящей через счетчик в единицу времени, необходимо снять показания  $N_1$  а затем через час —  $N_2$ . Разность показаний за один час и будет средней мощностью потребителей за один час.

В тех случаях, когда необходимо определить мощность потребителя за более короткий промежуток времени, необходимо считать число импульсов (оборотов диска), например, за одну минуту  $N_1$ . Полученное число импульсов (оборотов диска) умножить на 60 (число минут в 1 часе), получаем число импульсов (оборотов диска)  $N_1 \cdot 60$ , если бы потребитель работал с неизменной нагрузкой в течение часа. На лицевой панели счетчика написано, например, 1 кВт·час — 1 200 об. диска. Тогда реальная активная мощность, потребляемая за 1 час, составит

$$P_{ДЕЙСТ} = N_1 \cdot 60 / 1\ 200.$$

Электронный счетчик позволяет определить мощность потребителя по числу импульсов, получаемых от светодиодов на лицевой панели.

### 2.3. Подключение потребителей по четырехпроводной схеме

В сельском хозяйстве электрическая энергия используется:

- в электродвигателях, где электроэнергия преобразуется в механическую энергию, приводящих в работу вентиляторы, вакуумные насосы доильных установок, навозные транспортеры в разнообразных металлообрабатывающих станках, насосах для добывания и транспортировки воды;

- осветительных установках, обеспечивающих необходимую освещенность как в бытовых помещениях, так и в производственных условиях. Известно, что наружное уличное освещение влияет на настроение людей. Снижение освещенности металлообрабатывающих станков пагубно сказывается на производительности и на здоровье людей и животных;
- облучательных установках, обеспечивающих необходимое обеззараживание воды, способствующих ускоренному росту животных;
- электронагревательных установках, обеспечивающих необходимые комфортные условия для жизни людей и животных;
- охладительных установках, обеспечивающих сохранность произведенной сельскохозяйственной продукции;
- компьютерах, радио и телевизионных приемниках.

Когда к существующей нагрузке подключаются другие электроприемники, то это соответствует параллельному подключению сопротивлений. Общее сопротивление уменьшается, а это приводит к увеличению тока по закону Ома.

Подключение потребителей в сетях до выхода ГОСТ 50571 осуществлялось по четырехпроводной схеме (рис. 2.3). В четырехпроводной схеме нулевой проводник выполнял две функции, он использовался:

- для подключения однофазных электроприемников;
- для зануления корпусов электроприемников, нормально не находящихся под напряжением.

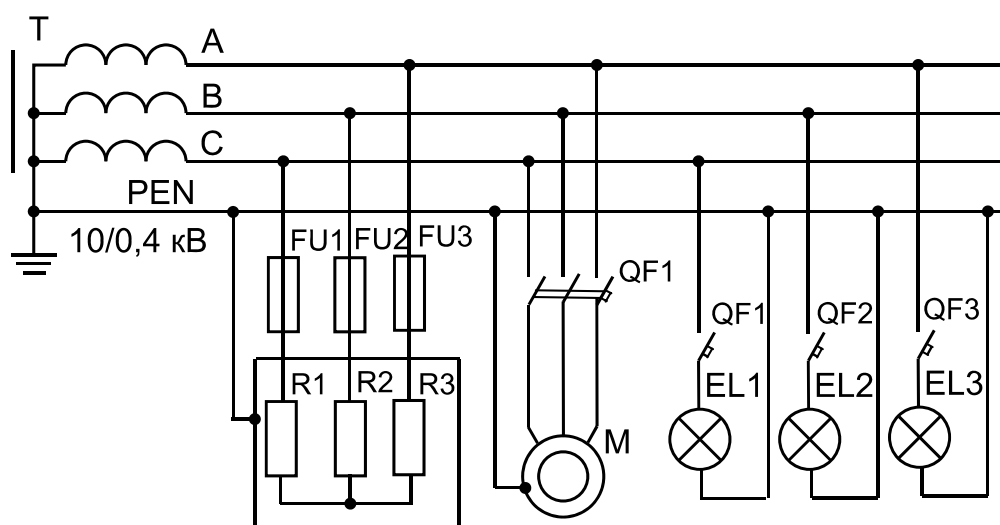


Рис. 2.3. Подключение потребителей в 4-проводной сети 380/220 В

На рисунке 2.3 обозначено: Т 10/04 — обмотка низкого напряжения трансформатора, соединенная в «звезду» с выведенным нулевым проводом.

FU4, FU5, FU6 — предохранители, защищающие сеть от больших токов при замыкании на корпус или между собой сопротивлений R1, R2, R3 трехфазного нагревателя; QF1 — автоматический выключатель, предохраняющий сеть от протекания больших токов при повреждении внутри электродвигателя М; FU1, FU2, FU3 — предохранители, защищающие сеть от токов коротких замыканий в осветительных лампах E11, E12, E13.

Зануление — это электрическое соединение нулевой точки источника (трансформатора) с корпусом электроприемника. Использование нулевого провода по такой схеме приводило к тому, что при несимметричной нагрузке, создаваемой однофазными потребителями, от протекания тока несимметрии на нулевом проводе возникает падение напряжения. Это напряжение прикладывалось ко всем корпусам электроприемников и к металлическим элементам, соединенных с нулевым проводом (автопоилки, корпуса щитов, корпуса электродвигателей). В случае прикосновения к корпусам животные или люди испытывали неприятные пощипывания. Уже при напряжении на автопоилках в 5 В относительно земли удои коров снижались до 10%.

Производственные нагрузки в большинстве случаев получают питание от трехфазных трансформаторов. От четырех выводов низкого напряжения трансформатора прокладывают четыре проводника до помещения: три фазных и нулевой. После внедрения ГОСТ 50571 нулевой проводник называется PEN, совмещающий функции нулевого рабочего проводника N и нулевого защитного проводника PE. Внутри помещений эти два нулевых проводника следует разделять.

В сельском хозяйстве различают бытовую, коммунально-бытовую и производственную нагрузки. Все виды нагрузок подключаются к сетям 380/220 В или к сети 220 В от однофазных трансформаторов. В результате обследований, проведенных Московским энергетическим университетом, бытовая нагрузка содержит 101 разновидность потребителей (нагреватели, освещение, холодильники, стиральные машины, компьютеры, зарядные устройства и т.д.). Коммунально-бытовые потребители — это школы, больницы, клубы, библиотеки. Среди производственных потребителей преобладает электродвигательная нагрузка. Так, на некоторых зерноперерабатывающих пунктах установлено до 60 электродвигателей разной мощности. Все электродвигатели, нагреватели соединяются между собой проводниками и подключаются к се-

ти параллельно. По мере увеличения числа подключенных потребителей их сопротивление в каждой фазе уменьшается, и фазный ток, потребляемый от трансформатора, растет.

Бытовая нагрузка в большинстве сельских поселений является преобладающей по сравнению с производственной. Бытовая нагрузка подключается к одной фазе трехфазной линии, отходящей от питающего трехфазного трансформатора, чаще всего, в сельской местности такой трансформатор преобразует 10 кВ в 380/220 В. В малых населенных пунктах используют однофазные трансформаторы 10/0,23 кВ. Студенту с первого курса необходимо иметь представление, каким образом электроэнергия попадает к потребителям. Среди бытовых потребителей преобладающей является осветительная нагрузка. Освещение бытовых помещений осуществляется пока в большинстве жилых помещений лампами накаливания или энергосберегающими люминесцентными лампами. Если на лампе накаливания написано: 63 Вт, 220 В, это значит, что лампа предназначена для включения в сеть с напряжением 220 В и будет потреблять из сети ток, вычисляемый по формуле мощности:

$$I_1 = P_1/U = 63 \text{ В} \cdot \text{А} / 220 \text{ В} = 0,286 \text{ А}.$$

Сопротивление одной такой лампы по закону Ома составит:

$$R_1 = U/I_1 = 220 / 0,286 = 769 \text{ Ом}.$$

Подключение к сети второй лампы равносильно включению второго сопротивления, параллельного первому. Их общее сопротивление снижается в два раза, соответственно, в два раза возрастает потребляемый ток двумя лампами. Также параллельно к лампам параллельно включается утюг, нагреватель, однофазный электродвигатель, компьютер, телевизор представленный на схеме (рис. 2.4) сопротивлением  $R$ , включаемый через розетку XS. Суммарный ток  $I_{\text{СУМ}}$  всех потребителей проходит через токовую обмотку счетчика активной энергии  $PI$ , который выполняет вычисления по математической формуле

$$W = U_{\text{СЧ}} I_{\text{СУМ}} \cos \varphi_{\text{ПОТР}} t_{\text{ИЗМ}} = N_{\text{КОН}} - N_{\text{НАЧ}}.$$

где  $W$  — количество электроэнергии, подсчитанное счетчиком, кВт·ч;

$U_{\text{СЧ}}$  — напряжение, подведенное к обмотке напряжения счетчика, обычно  $U_{\text{СЧ}} = U_{\text{ПОТР}}$ ;

$\cos \varphi_{\text{ПОТР}}$  — коэффициент мощности потребителя, у лампы накаливания,  $\cos \varphi_{\text{ПОТР}} = 1$ ;

$N_{\text{КОН}}, N_{\text{НАЧ}}$  — показания счетчика в конце и в начале времени, за которое производятся измерения (за месяц, за год);

$t_{\text{ИЗМ}}$  — промежуток времени между измерениями (месяц, год).

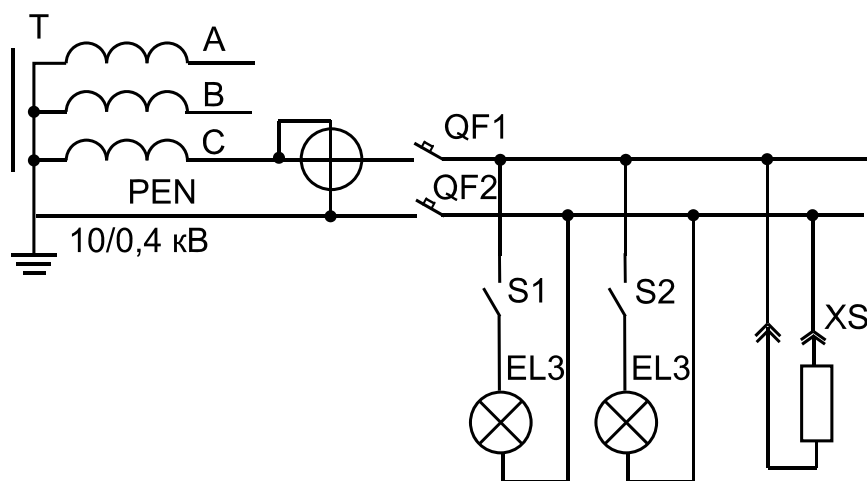


Рис. 2.4. Питание бытовых потребителей от 4-проводной сети

Если через счетчик протекает ток электродвигателя холодильника или стиральной машины, то прибор учтет только активную составляющую тока. Эта активная составляющая совершает полезную работу, например, вращает барабан стиральной машины. Реактивная составляющая тока используется для создания магнитного потока электродвигателя, счетчиком активной энергии не учитывается.

В старых домах в квартиры заводилось два провода для питания бытовых потребителей. В фазном и нулевом проводах устанавливались автоматические выключатели QF1, QF2 для отключения возможных коротких замыканий. Представим, что в момент заворачивания цоколя лампы в патроне соединились лепестки. Сопротивление соединенных лепестков значительно меньше сопротивления нити лампы накаливания 769 Ом. Пусть переходное сопротивление вместе с питающими проводами составит  $R_{КЗ} = 0,5$  Ома. Тогда по проводами и через обмотку питающего трансформатора будет протекать ток короткого замыкания КЗ, величина тока определяется по закону Ома

$$I_{КЗ} = U/R_{КЗ} = 220/0,5 = 440 \text{ А.}$$

От такого большого тока замкнувшиеся лепестки патрона расплавляются за очень короткое время. Провода в бытовых помещениях рассчитываются на длительное протекание тока до 20 А, поэтому от тока КЗ провода разогреются за несколько секунд и их изоляция расплавится. Количество выделившегося в проводниках тепла вычисляется в соответствии с законом Джоуля-Ленца. Расплавленные провода с горючей изоляцией, как правило, вызывают пожар. Чтобы этого не случилось любые короткие замыкания в бытовой сети должны отключаться со временем, не превышающем 0,3 с.

Среди бытовых потребителей преобладает осветительная нагрузка, подключаемая на фазное напряжение 220 В. В лампе накаливания от протекающего тока разогревается спираль, изготовленная из высокоомного проводника. Если известна мощность лампы или однофазного нагревателя без вентилятора, то (он) она потребляет только активную мощность, и ток находим в соответствии с формулой

$$P_{Л}^{(1)} = U_{\phi} I_{Л}, \quad I_{Л} = P_{Л}^{(1)} / U_{\phi},$$

где  $U_{\phi}$  — фазное напряжение, которое подводится к потребителю;  
 $I_{Л}$  — величина тока, протекающего через сопротивление потребителя. Индекс (1) указывает, что нагрузка подключена к одному фазному и к нулевому рабочему проводу.

Среди производственных потребителей к одной фазе подключаются осветительные, облучательные, однофазные нагревательные установки. К трем фазам подключаются трехфазные нагреватели и трехфазные электродвигатели. Нагреватель представляют собой спираль из высокоомного провода, помещенную в металлическую трубку и изолированную от корпуса трубки мелким песком.

Как уже рассматривали, в электрических сетях, выполненных по старым проектам, нулевой проводник используется как рабочий, так и защитный. Он подключается как к электроприемникам, так и к корпусам. Недостаток такой схемы заключается в том, что однофазные электроприемники E11, E12, E13 создают несимметричную нагрузку, тогда геометрическая сумма их токов протекает по нулевому проводнику PEN. На этом проводнике может теряться напряжение до десятка В, это напряжение прикладывается ко всем корпусам электроприемников, что представляет опасность для жизни людей и животных.

#### **2.4. Подключение потребителей по пятипроводной схеме**

В технической литературе фазные проводники часто обозначают А, В, С. Проводники  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  и PEN в производственном помещении или в многоквартирном жилом доме заходят в шкаф ввода или распределительный щит. Из распределительного щита внутри помещения отходит обычно несколько линий (рис. 2.5). В соответствии с ГОСТ 50571, каждая линия к трехфазным потребителям содержит пять проводов: три фазных, а нулевой проводник в распределительном щите разделен на два: нулевой рабочий N и защитный PE. К однофазным светильникам подводят три провода: по фазному и нулевому рабочему проводникам протекает ток нагрузки потребителя, а защитный проводник PE проводит ток при коротком замыкании на корпус светильника и обеспечивает срабатывание защиты автоматического выключателя или предохранителя.

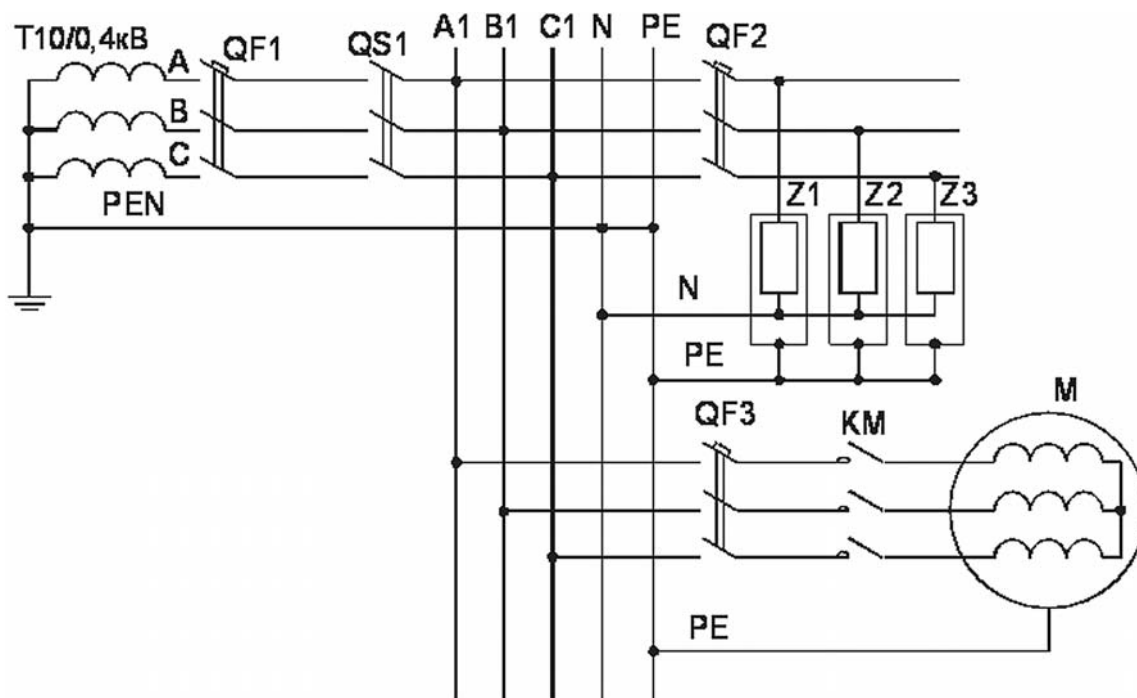


Рис. 2.5. Пятипроводная сеть 380/220 В

На схеме (см. рис. 2.4) показано подключение производственного помещения от трансформатора Т через автоматический выключатель QF1 по четырем проводам: А, В, С, PEN. Перед распределительным щитом в помещении установлен разъединитель QS1. При отключении QS1 можно выполнять ремонтные работы на шинах щита. В распределительном щите нулевой провод PEN разделен на два: рабочую нулевую шину N (N — *Neutral* — *нейтраль*) и защитную PE (PE — *Protect Earth* — *защита земля*). От шин запитаны нагреватели и электродвигатель. Каждый из трех однофазных нагревателей Z1, Z2, Z3 подключен к фазному напряжению через трехфазный или три однофазных автоматических выключателя QF2 (показан трехфазный). К ним подводится рабочий нулевой проводник N. Корпуса всех нагревателей соединены с защитным нулевым проводником PE. При однофазном повреждении изоляции в электроприемнике увеличивается ток в фазном проводе и нулевом защитном проводнике PE. От увеличения тока срабатывает либо предохранитель с плавкой вставкой, либо автоматический выключатель.

Трехфазный электродвигатель М подключен к распределительному щиту через автоматический выключатель QF3, а управляется дистанционно от кнопок управления или от схемы автоматики магнитным пускателем КМ. Магнитный пускатель — это электромагнитный аппарат, предназначенный для дистанционного управления асинхронными электродвигателями.



Для трехфазных нагревателей три сопротивления находятся в одинаковых условиях, по каждому из них протекает одинаковый по величине ток. Активная мощность  $P^{(3)}$ , потребляемая нагревателем из сети, равна мощности трех однофазных нагревателей и вычисляется по формуле

$$P^{(3)} = 3 P^{(1)} = 3 U_{\phi} I_{\phi} = \sqrt{3} U_{л} I_{\phi},$$

где  $U_{\phi}$  — фазное напряжение на каждой фазе нагревателя, между точками А1 и N;

$U_{л}$  — линейное (междуфазное) напряжение, подведенное из сети.

Чтобы свести до минимума гибель людей в быту при ошибочном прикосновении к фазному проводу, введена трехпроводная система питания бытовых потребителей.

Для осуществления трехпроводной схемы питания на вводном щите жилого помещения нулевой провод, приходящий с трансформаторного пункта, называется PEN. На вводе в жилой дом он разделяется на рабочий N и защитный PE нулевые проводники. В многоквартирных домах разделение осуществляется на вводном щите путем формирования двух нулевых шин. В квартиры вводят три провода. По фазному и нулевому N проводнику протекает ток нагрузки, а PE-проводник подключается к корпусам электроприемников (двигателей, нагревателей, металлическим частям осветительных приборов).

Рассмотрим примеры:

1. В существующей квартире используется двухпроводная система питания потребителей, вечером включается три лампы по 100 Вт, 220 В. Определить ток, потребляемый лампами накаливания.

Осветительные лампы включаются параллельно. Каждая лампа потребляет ток, определяемый по формуле (1)

$$I_1 = \frac{P_1}{U} = \frac{100 \text{ Вт}}{220 \text{ В}} \approx 0,45 \text{ А.}$$

Три лампы потребляют ток в три раза больше  $I_3 = 3I_1 = 1,35 \text{ А}$ . Дополнительно необходимо подключить электрочайник мощностью 1,7 кВт. Выдержат ли электрические провода такую нагрузку?

Вычислим ток, потребляемый чайником

$$I_{\text{ч}} = \frac{1700 \text{ Вт}}{220 \text{ В}} \approx 7,73 \text{ А.}$$

Общая нагрузка по току в квартире составит:

$$I_{\text{ОБЩ}} = I_3 + I_4 = 1,35 + 7,73 = 10,4 \text{ А.}$$

Электропроводка в старых квартирах выполнялась алюминиевым проводом сечением  $2,5 \text{ мм}^2$ . Такой провод длительно выдерживает ток без перегрева  $I_{\text{ДОП}} = 19 \text{ А}$ . Поэтому подключение дополнительной нагрузки не приведет к расплавлению изоляции проводов  $I_{\text{ОБЩ}} < I_{\text{ДОП}}$ .

2. Для увеличения срока службы в подъезде включили две лампы накаливания последовательно на напряжение  $220 \text{ В}$ . На каждой лампе нанесена маркировка  $75 \text{ Вт}$ ,  $220 \text{ В}$ . При номинальном напряжении через такую лампу будет циркулировать ток:

$$I_1 = \frac{75 \text{ Вт}}{220 \text{ В}} \approx 0,34 \text{ А.}$$

Сопротивление нити накаливания лампы составит по закону Ома для участка цепи:

$$R_1 = \frac{U}{I_1} = \frac{220 \text{ В}}{0,34 \text{ А}} = 647 \text{ Ом.}$$

При включении лампы на напряжение  $220 \text{ В}$  потребление мощности составит  $75 \text{ Вт}$ . Если она будет гореть в течение суток, то за  $24$  часа она израсходует энергии:

$$W_{\text{СУТ}} = 24 P_{\text{Л}} = 24 \cdot 75 = 1\,800 \text{ Вт}\cdot\text{часов} = 1,8 \text{ кВт}\cdot\text{часа.}$$

Срок службы ламп накаливания при напряжении  $220 \text{ В}$  составляет  $1\,000$  часов, тогда в течение года лампу необходимо заменять восемь раз (в году  $8\,760$  часов).

При последовательном включении по лампам протекает общий ток, а напряжение распределится поровну на каждую лампу, так как их сопротивления одинаковые. На каждой лампе будет напряжение  $U_1 = U_2 = U/2 = 110 \text{ В}$ . Ток через лампы также уменьшится в два раза:

$$I_2 = \frac{U}{2 R_1} = \frac{220 \text{ В}}{2 \cdot 647 \text{ Ом}} = 0,17 \text{ А.}$$

Мощность, которую будет потреблять каждая лампа, равна:

$$P_2 = U_2 I_2 = 110 \cdot 0,17 = 18,7 \text{ Вт.}$$

Две лампы будут потреблять мощность:

$$P_{12} = 2 P_2 = 2 \cdot 18,7 \approx 37,5 \text{ Вт.}$$

Таким образом, благодаря тому, что ток через лампу снижается в два раза срок службы такой лампы составит не  $1\,000$  часов, как при обычном напряжении, а несколько лет. Освещенность уменьшится в несколько раз, но ее достаточно, чтобы увидеть замочную скважину, но расход электроэнергии снизится в два раза.

3. Определить количество электроэнергии, которое будет потребляться электрочайником в течение месяца, если каждый день чайник включается на 1 час:

$$W_{\text{ч}} = P_{\text{ч}} t = 1,7 \cdot 30 = 51 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Для питания бытовых или других однофазных потребителей от пятипроводной сети необходимо прокладывать три провода: фазный, нулевой рабочий N и нулевой защитный PE. Провод PE подключается к корпусам электроприемников и предназначен для защиты людей от поражения электрическим током в случае повреждения изоляции фазного провода или при КЗ фазного провода на корпус электроустановки.

## 2.5. Принцип работы асинхронного двигателя

Наибольшую мощность из нагрузок потребляют трехфазные асинхронные электродвигатели (АД). Электродвигатели предназначены для преобразования электрической энергии в механическую. Их называют электромеханическими преобразователями. Наибольшее распространение получили асинхронные электродвигатели. Асинхронными они получили название из-за того, что у них частота вращения ротора всегда меньше частоты вращения магнитного поля, создаваемого обмотками статора. Ротор и магнитное поле статора вращаются несинхронно [6].

Конструктивно электродвигатель имеет статор, ротор с подшипниками, подшипниковые щиты, которые соединяют ротор и статор. Ротор и приводная машина (вентилятор, насос) соединяются между собой муфтой. Между ротором и статором имеется воздушный зазор. Статор лапами крепится к фундаменту, на котором закрепляется и приводная машина. Статор набирается из кольцевых листов трансформаторной стали с пазами. В пазы листов статора виток к витку укладывается обмотка статора (рис. 2.6).

Ротор набирается также из листов трансформаторной стали, в пазы которой заливаются обычно алюминиевые стержни, соединенные между собой кольцами с выступами, которые выполняют роль внутреннего вентилятора электродвигателя. Такой ротор похож на беличье колесо (в зоопарке во внутренней полости такого колеса бегают белки), поэтому его называют беличьей клеткой.

Представим в разрезе АД. В корпус статора впрессовываются кольцевые листы трансформаторной стали толщиной 0,35 мм, изолированные друг от друга слоем лака. В пазы железа статора укладывается трехфазная обмотка из медной изолированной проволоки. Катушку обмотки из двух витков одной фазы представим на разрезе пазов статора по продольной оси (см. рис. 2.5).

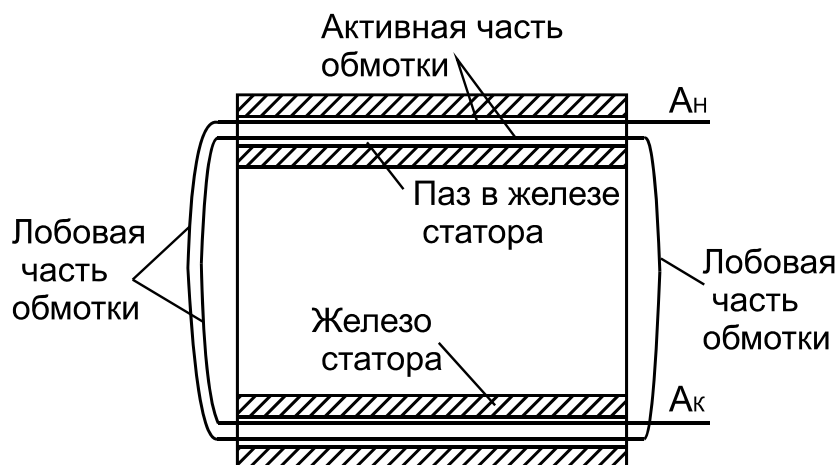


Рис. 2.6. Продольный разрез статора

Изобразим одновитковую обмотку с диаметральной шагом, убрав лобовую часть. Начала и концы обмоток замаркируем  $A_H - A_K, B_H - B_K, C_H - C_K$ . Концы обмоток соединим вместе — получаем соединение в «звезду». Соединение в «звезду» выполняется либо в коробке выводов, либо на лобовых частях. Выводы  $A_H, B_H, C_H$  соединим с питающей сетью 380 В (рис. 2.7). Концы обмоток на заводе-изготовителе выводят в коробку выводов и маркируют для первой фазы  $C_1 - C_4$ , для второй  $C_2 - C_5$ , для третьей  $C_3 - C_6$ .

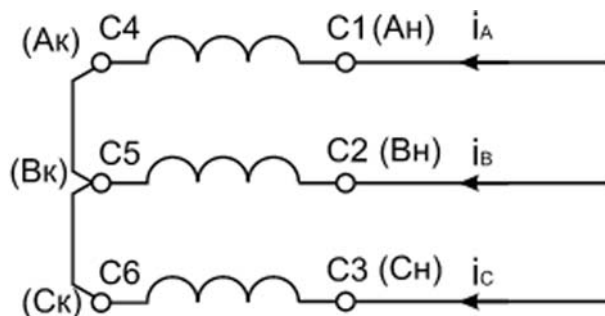


Рис. 2.7. Подключение сети к обмоткам АД

Под действием подведенного трехфазного напряжения  $U_{\text{сети}} = 380 \text{ В}$  по обмоткам статора протекают токи. Рассмотрим принцип получения вращающегося магнитного поля на примере статора с удаленным ротором. Если ротор удален, то при подведении напряжения 380 В обмотка статора сгорит от тока, намного больше номинального. Такой ток протекает из-за малого индуктивного сопротивления, поэтому в опытах с удаленным ротором на статор подают такое пониженное напряжение, чтобы ток не превышал номинальный. В исходном положении расположим синусоиды токов, протекающих в обмотках статора, так, что в

фазе А ток будет иметь максимальное мгновенное значение  $|I_A| = i_A$  (рис. 2.8). Мгновенное значение тока — это проекция на вертикальную ось и обозначать его будем прописной буквой  $i$ .

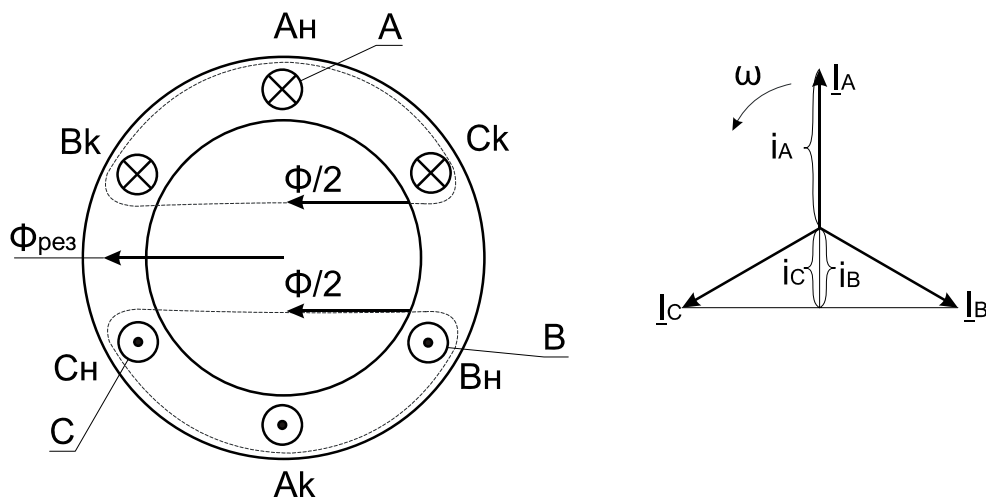


Рис. 2.8. Создание магнитного поля обмоткой статора

Если мгновенное значение тока расположено выше горизонтальной оси, то это направление тока в обмотке «от нас» — крестик, если ток расположен ниже горизонтальной оси, направление его «к нам» — точка. В фазах В и С величина мгновенных токов будет в два раза меньше и имеет противоположное направление по отношению к фазе А  $i_B = i_C$ . В фазе А ток направлен от начала к концу обмотки — от нас, а в фазах В и С — от конца к началу. При указанном положении векторов видно, что токи в ветвях А<sub>Н</sub>, В<sub>к</sub>, С<sub>к</sub> имеют одинаковое направление. Они создают суммарный магнитный поток  $\Phi/2$ , направленный по часовой стрелке по правилу правоходового винта. Токи в ветвях С<sub>Н</sub>, А<sub>к</sub>, В<sub>Н</sub> имеют направление на нас. По правилу правоходового винта, их суммарный магнитный поток  $\Phi/2$  имеет то же направление, что и в первом случае. От сложения двух потоков  $\Phi/2$  получаем магнитный поток, выходящий из «северного полюса», замыкающийся по железу статора, и входящего в «южный полюс». В этом случае обмотка имеет одну пару полюсов, пара полюсов обозначается  $p = 1$ .

Сдвинем вектора токов на  $90^\circ$  против часовой стрелки (рис. 2.9), что соответствует четверти периода (0,005 с), тогда мгновенное значение тока в фазе А  $i_{A90}$  равно нулю. В фазе В ток  $i_{B90}$  изменит свое направление и будет протекать от начала к концу, а в фазе С направление тока не изменится. Тогда суммарный магнит-

ный поток  $\Phi_{90}$  обмотки статора повернется на  $90^\circ$  по часовой стрелке (см. рис. 2.9). При дальнейшем повороте векторов также будет поворачиваться суммарный магнитный поток. Значит, сдвиг обмоток статора в пространстве на  $120^\circ$  и одновременно сдвиг токов в обмотках на  $120^\circ$  во времени создают вращающееся магнитное поле. Частота вращения этого магнитного поля зависит от числа пар полюсов, создаваемых обмоткой статора.

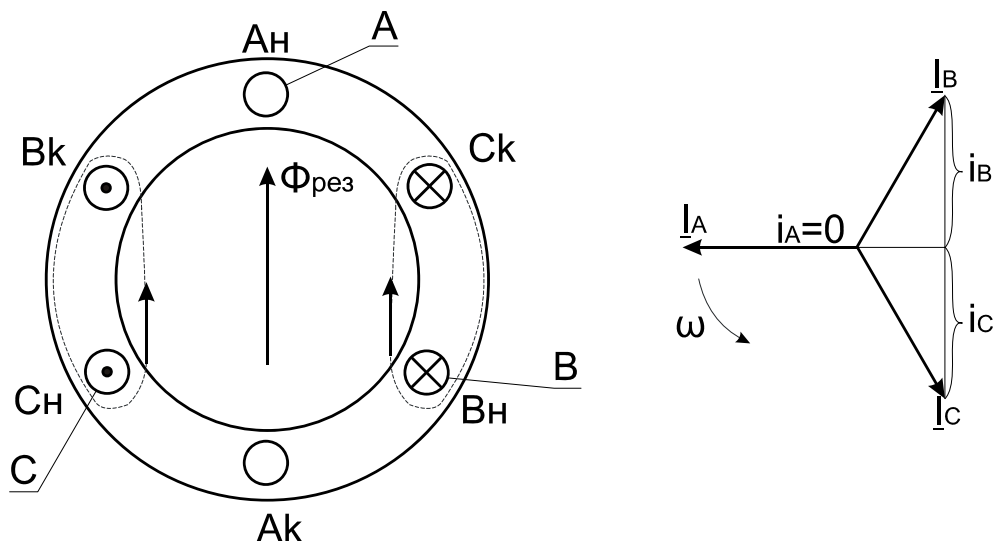


Рис. 2.9. Поворот результирующего магнитного потока статора при повороте векторов тока

При известной частоте тока в обмотках  $f = 50$  Гц частота вращения магнитного поля статора находится из выражения частоты вращения роторов генераторов:

$$f = \frac{p n}{60}, \quad \text{отсюда} \quad n_1 = \frac{60 f}{p}.$$

Получаем  $n_1 = 3\,000$  об/мин — частота вращения магнитного поля статора.

Вставим в расточку статора ротор с обмоткой. В какую сторону будет направлена сила, действующая на проводники обмотки ротора? Для этого определим направление ЭДС в обмотках ротора по правилу правой руки. Если в первый момент времени магнитное поле статора относительно проводников ротора движется справа налево, то направление ЭДС в обмотке ротора определится по правилу правой руки. Силовые линии магнитного поля входят в ладонь, проводник в магнитном поле движется вниз — показывает большой палец, тогда четыре пальца правой руки покажут направление тока в проводниках ротора «от нас» (рис. 2.10).

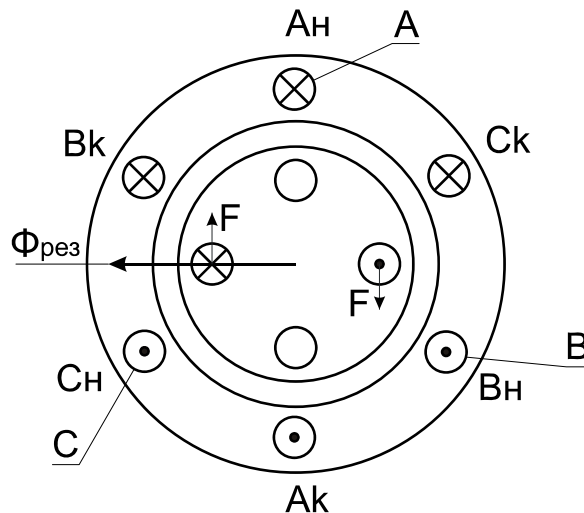


Рис. 2.10. Направление сил, действующих на обмотку ротора

Следует представлять, что если магнитное поле статора движется по часовой стрелке, то проводник ротора относительно этого поля движется против часовой стрелки. Поэтому левый проводник движется вниз, это направление движения проводника и показывает большой палец правой руки. Сопротивление обмотки ротора активное, тогда и ток в обмотке ротора будет иметь то же направление, что и ЭДС.

По правилу левой руки, четыре пальца показывают направление тока в обмотке ротора, силовые линии магнитного поля заходят в ладонь, а большой палец вверх указывает направление силы, действующей на проводник. Проводник ротора стремится двигаться за направлением вращения магнитного поля статора. На противоположной стороне ротора сила, действующая на проводники ротора, направлена вниз. Таким образом, получаем вращающий момент ротора относительно оси.

ЭДС в обмотке ротора создается за счет пересечения витков обмотки магнитным полем статора. Если ротор будет вращаться с той же скоростью, что и магнитное поле статора, то не будет пересечения витков обмотки ротора магнитным полем, следовательно, не будет создаваться вращающий момент ротора. По этой причине всегда частота вращения ротора асинхронного двигателя меньше частоты вращения магнитного поля статора. Так, для двигателей с одной парой полюсов частота вращения ротора:

$$n_2 = 2900 \dots 2940 \text{ об/мин.}$$

В указанных пределах изменяется частота вращения ротора от степени загрузки электродвигателя механизмом.

Для получения других частот вращения необходимо изменять число пар полюсов обмотки статора асинхронного электродвигателя. Синхронная частота вращения магнитного поля статора составит:

- для  $p = 2$  (4 полюса) —  $n_1 = 1\,500$  об/мин;
- для  $p = 3$  (6 полюсов) —  $n_1 = 1\,000$  об/мин;
- для  $p = 4$  (8 полюсов) —  $n_1 = 750$  об/мин и т.д.

С увеличением числа полюсов увеличиваются габариты электродвигателя.

Для обеспечения безопасной работы электродвигателя, кроме трех фазных проводов L1, L2, L3, подключаемых к обмоткам, четвертый защитный проводник РЕ подключают к корпусу электродвигателя. В тех случаях, когда в помещении используется четырехпроводная, а не пятипроводная сеть (как положено по стандарту), к корпусу подключается проводник PEN. Для трехфазных электродвигателей на паспорте пишут мощность  $P_2$ , которую можно получить на выходе двигателя, на его валу.

$$P_2 = P_1 \eta = S_1 \cos \varphi \eta = \sqrt{3} U_{л} I_{\phi} \cos \varphi \eta,$$

где  $P_2$  — мощность, снимаемая с вала электродвигателя;

$P_1$  — активная мощность, потребляемая из сети;

$\cos \varphi$  — коэффициент мощности электродвигателя;

$\eta$  — коэффициент полезного действия электродвигателя.

$$\text{Отсюда } I_{дв} = \frac{P_2}{\sqrt{3} U_{л} \cos \varphi \eta}.$$

Определение  $\cos \varphi$  и  $\eta$  на работающем двигателе гораздо сложнее, чем определение тока, поэтому здесь не рассматривается. В эксплуатации измеряют ток токоизмерительными клещами. Для определения приближенного значения тока трехфазного электродвигателя на 380 В  $I_{дв}$ , А, электромонтеры пользуются упрощенной формулой

$$I_{дв} = \left| 2 P_{дв} \right|.$$

Ток, потребляемый трехфазным электродвигателем с обмоткой статора на 380 В примерно равен удвоенной мощности электродвигателя, выраженной в кВт. Полученное значение отличается от истинного на 5-10%. Так, трехфазный электродвигатель мощностью 3 кВт потребляет примерно 6 А.



## 2.6. Обеспечение безопасной эксплуатации электроприемников

Начинающий электрик должен представлять, какую опасность таит в себе электроэнергия. Строгое соблюдение правил безопасной эксплуатации электроустановок никогда не приводит к печальным результатам. Всегда опасно прикосновение человека к токоведущим частям, находящимся под напряжением, так как человек представляет собой сопротивление, и через него будет протекать ток.

В двухпроводной сети опасно прикосновение человека к фазному проводу. Если человек стоит на деревянном полу и в обуви с резиновой подошвой, то через него будет протекать ток, не ощущаемый нервными окончаниями в коже. Человек может ощутить легкое пощипывание. Однако если человек стоит на бетонном полу или на земле, то при прикосновении в фазному проводу через него будет протекать ток по контуру: фаза – рука – нога – земля – фазная обмотка трансформатора. Сопротивление человека в расчетах принимается 1 000 Ом, тогда через человека будет протекать ток:

$$I_{чел} = U/R_{чел} = 220/1\ 000 = 0,22\ А.$$

А ток величиной 0,1 А, протекающий через человека, считается смертельным.

Ток величиной 0,06 А называется неотпускающим. При протекании такого переменного тока мышцы, например, пальцы руки, судорожно сокращаются, и человек не в силах их разжать, хотя мысленно дает команду на разжатие пальцев. А при длительном протекании тока смертельный исход неизбежен. Чтобы этого не случилось, первое прикосновение к любым токоведущим частям необходимо выполнять тыльной стороной пальцев или ладони. Тогда при протекании тока человек быстро отдергивает руку без печальных последствий.

Чтобы не забывать правила техники безопасности при работах в электроустановках и постоянно помнить об опасностях касания токоведущих частей, находящийся под напряжением весь электротехнический персонал сдает экзамены на группу допуска с 1-й по 5-ю по технике безопасности. Удостоверение о сдаче соответствующих экзаменов от 2- до 5-й группы работник всегда должен иметь при себе при работе в электроустановках.

В быту, чтобы не попасть под напряжение, каждый должен помнить «золотое» правило электрика:

### ОТКЛЮЧИ – ПРОВЕРЬ – ЗАЗЕМЛИ.

**ОТКЛЮЧИ** — это значит перед производством работ отключи электроустановку автоматическим выключателем, разъединителем, рубильником. Желательно иметь видимый разрыв. **ПРОВЕРЬ** — проверка отсутствия напряжения производится указателем напряжения (токоискателем, вольтметром). Для проверки предварительно надо убедиться в исправности указателя напряжения на установке, заведомо находящейся под напряжением, например, в соседней квартире. **ЗАЗЕМЛИ** — в быту лучше всего соединить между собой фазный и нулевой проводники, чтобы в случае подачи напряжения посторонним лицом произошло короткое замыкание, при котором сработает защитное устройство. При работе, например, на воздушной линии специальными закоротками соединяют заземление опоры с тремя фазными проводами. Закоротками называют четыре переносных гибких многожильных провода, соединенных между собой, на концах проводов установлены струбцины, одна струбцина соединяется с заземляющим устройством, а три другие соединяются с защищаемыми проводами. Многожильные провода закороток должны длительно выдерживать токи трехфазных коротких замыканий, из этого условия выбирается их сечение.

В сетях 380/220 В работают под напряжением с группой по технике безопасности не ниже 4-й. Прикосновение к токоведущим частям, находящимся под напряжением, разрешается основными защитными средствами: инструментом с изолированными ручками, диэлектрическими перчатками, указателями напряжения. Эти защитные средства должны быть проверенными повышенным напряжением в соответствии с нормами испытания и иметь соответствующие бирки или штампы о сроках следующих испытаний.

#### *Контрольные вопросы*

1. Что такое номинальное напряжение?
2. Какие потребители относятся к 1-й, 2-й, 3-й категории по надежности электроснабжения?
3. Как измерить ток и напряжение токоизмерительными клещами?
4. Как определяют количество потребленной электроэнергии?
5. Как вычислить мощность электроприемника по показаниям счетчика активной энергии?

6. К чему подключается нулевой проводник в четырехпроводной системе питания потребителей?
7. Куда подключаются проводники в пятипроводной системе электроснабжения?
8. Нарисуйте контур тока, протекающего через человека при прикосновении к фазному проводу, находящемуся под напряжением.
9. Что такое «золотое правило» электрика?
10. Как проверить отсутствие напряжения на выводах электроустановки?

### 3. ТЕХНОЛОГИЯ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Тепловая и электрическая энергии прочно вошли в нашу жизнь. Эти два вида энергии получают от энергетических установок, которые делят на традиционные и нетрадиционные. Традиционные энергетические установки обеспечивают энергией большое количество потребителей, используя распространенные принципы получения и преобразования первичной энергии (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Виды энергетических установок

Назначение всех видов энергетических установок — получение тепловой и электрической энергии. Потребление энергоресурсов во всем мире увеличивается с каждым годом. Перерыв электроснабжения даже на небольшой промежуток времени резко отражается на производительности труда и на настроении всех людей.

Наибольшее количество электроэнергии вырабатывается на тепловых, атомных и гидравлических станциях.

### **3.1. Принцип работы конденсационной тепловой электростанции**

В России 80% электроэнергии вырабатывается на тепловых электростанциях, которые используют невозобновляемые источники энергии: уголь, торф, газ, мазут. В тепловых электростанциях (ТЭС) химическая энергия топлива превращается в электрическую путем нескольких переходов из одного вида энергии в другую. ТЭС имеют разновидности: конденсационные (КЭС), теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), газотурбинные, парогазовые, атомные электростанции (АЭС). Наибольшее количество электроэнергии вырабатывается на КЭС, обычно такие электростанции исторически называют ГРЭС (государственные районные электрические станции). Они предназначены для питания электроэнергией областей или больших промышленных районов. Конденсационными такие электростанции называются потому, что большая часть пара, прошедшего через турбину, охлаждается и превращается в воду-конденсат в конденсаторе.

Опишем упрощенно технологический процесс работы электростанций. Любая КЭС в тепловой части включает четыре обязательных элемента: парогенератор (котел); турбоагрегат; конденсатор; питательный насос. В электрической части на КЭС устанавливают генераторы, трансформаторы и электродвигатели. КЭС обычно работают по блочной схеме. Блок — это единая технологическая цепочка, в которой последовательно соединены: парогенератор — турбина — электрогенератор — трансформатор. Наибольшее распространение получают блоки мощностью 300, 500, 800 МВт. Самый мощный блок работает на Костромской ГРЭС 1200 МВт. Выход из строя любого из этих элементов приводит к прекращению выработки электроэнергии. В ремонт выводят одновременно все элементы блока (рис. 3.2).

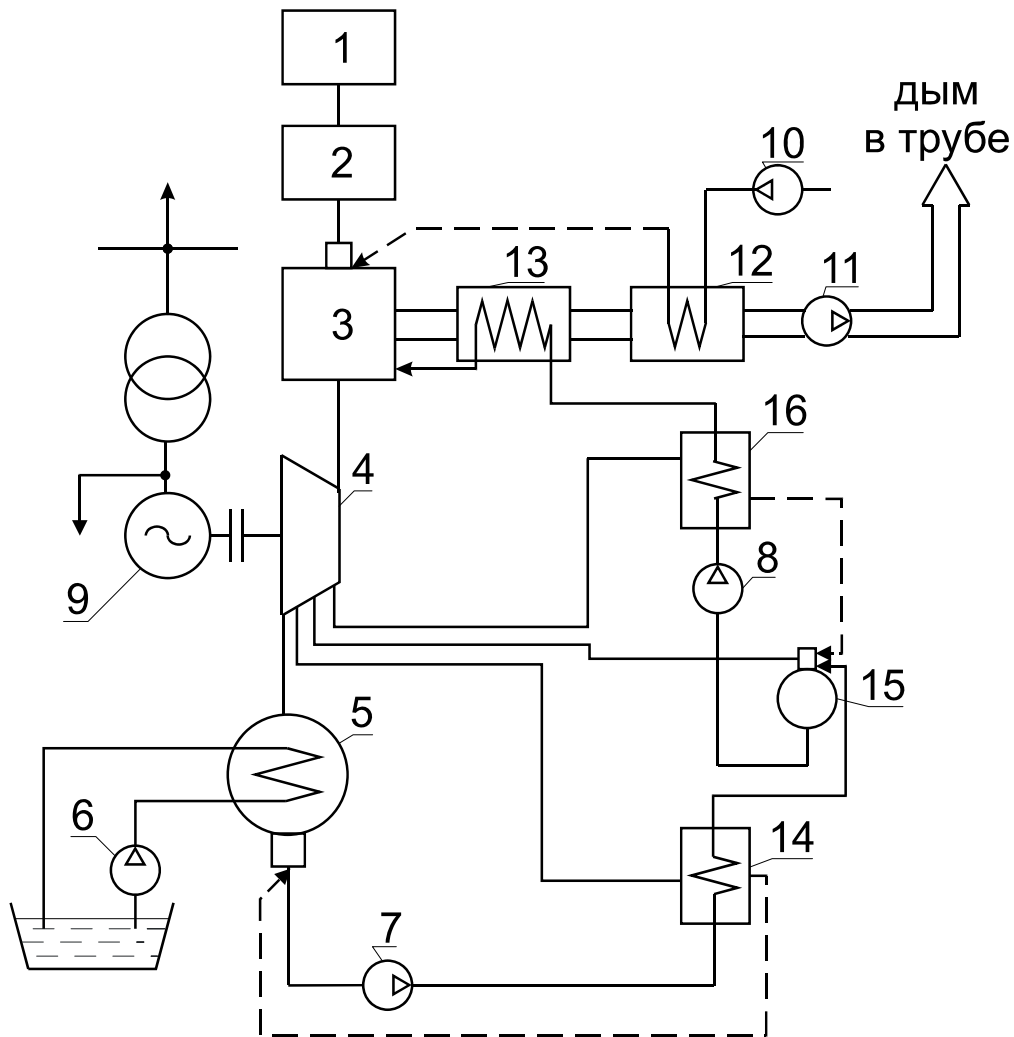


Рис. 3.2. Технологический процесс работы КЭС:

1 — склад топлива; 2 — топливоподача; 3 — парогенератор (котел); 4 — турбина; 5 — конденсатор; 6 — циркуляционный насос подает охлаждающую воду в конденсатор; 7 — конденсатный насос; 8 — питательный насос; 9 — генератор; 10 — дутьевой вентилятор подает воздух в котел; 11 — дымосос; 12 — воздухоподогреватель; 13 — подогреватель питательной воды; 14 — подогреватель воды низкого давления; 15 — деаэратор освобождает питательную воду от газов; 16 — подогреватель питательной воды.

1. Парогенератор представляет собой сложное инженерное сооружение. Само название указывает, что котел предназначен для получения пара. Для этого в котел подается топливо, воздух и вода под высоким давлением. Масса топлива (газ, мазут, уголь, торф) подается в котел в зависимости от требуемого количества пара. Для сжигания топлива туда же подается окислитель — воздух, содержащий кислород  $O_2$ . Воздух берется из атмосферы и предварительно подогревается. Для полного сжигания 1 кг топлива требуется 10-15 кг воздуха. В топке котла химическая энергия топлива превращается в тепловую

и лучистую энергии. Питательная вода, из которой образуется пар, протекает по трубной системе внутри котла. Сгорающее факелом топливо, предварительно превращенное в пыль, передает тепловую и лучистую энергию воде, проходящей по трубной системе котла. Вода нагревается до кипения и испаряется. В результате химической реакции сжигания топлива, его составляющая — углерод С превращается в оксиды  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$ , водород Н — в пары воды, сера S — в окислы серы  $\text{SO}_2$  и  $\text{SO}_3$  — получаем продукты сгорания — смесь различных газов. Сгоревшие газы передают энергию воде, циркулирующей по трубам внутри котла. Охлажденные в технологическом процессе выработки электроэнергии до температуры 130-160 ° С дымовые газы через дымовую трубу покидают ТЭС.

Часть тепловой энергии, переданная воде, обеспечивает образование пара высоких параметров (давления и температуры). Полученный пар в этом же котле перегревается выше температуры кипения. Этот пар с температурой  $T = 540$  °С и давлением до 240 атм (24 МПа) по трубопроводам подается в турбоагрегат.

2. *Турбоагрегат* содержит на одном валу паровую турбину, генератор и возбудитель. Перегретый пар из парогенератора направляется в многоступенчатую турбину. Входные лопатки ротора турбины имеют небольшую величину, по мере продвижения пара от одних лопаток к другим их размеры увеличиваются, а давление и температура пара снижаются. Именно расширение пара и обеспечивает превращение его потенциальной энергии в механическую энергию вращения турбины. Другими словами, в турбине тепловая энергия превращается в механическую, которая вращает ротор турбины и генератора.

Ротор турбины муфтами связан с ротором генератора, в обмотках которого генерируется электроэнергия. Для обеспечения выработки электроэнергии синхронным генератором в его ротор подается постоянный ток. Ротор является большим двухполюсным электромагнитом. Постоянный ток в ротор подается через токосъемные кольца от возбудителя. В простых схемах возбудителем является генератор постоянного тока.

3. На выходе из турбины отработавший пар попадает в конденсатор, в котором поддерживается вакуум 3-5 кПа (атмосферное давление примерно 100 кПа). *Конденсатор* — это теплообменник, по трубам которого непрерывно протекает охлаждающая вода. Конденсатор служит для конденсации паров после турбины и для создания высокого вакуума. Это позволяет снизить затраты энергии на

последующее сжатие образовавшейся воды и одновременно увеличивает работоспособность пара, т.е. позволяет получить большую мощность. Отработавший конденсат передает свою энергию охлаждающей воде, которая циркулирует по трубкам внутри конденсатора. В конденсаторе отработавший пар превращается в воду. Охлаждающая вода забирается из реки циркуляционными насосами и после охлаждения конденсаторов сбрасывается в реку. Вода в конденсаторах турбин нагревается, например, река Волга после Костромской ГРЭС не замерзает на расстоянии 15 км.

Циркуляционная вода для охлаждения конденсаторов может охлаждаться в градирнях, в которых она охлаждается потоком входящего воздуха, или в брызгальных бассейнах.

4. Сконденсированная вода после дополнительного пополнения, очищения подается снова в котел питательным насосом. Питательный турбо- или электронасос служит для подачи питательной воды в котел и создания высокого давления.

*Основное назначение тепловой части КЭС* — обеспечить работу генераторов. От генераторов электроэнергия поступает на повышающие трансформаторы, которые преобразуют генераторное напряжение 6, 10, 20, 24 кВ в напряжение связи с электрической системой 110, 220, 330, 500, 750 кВ. На стороне высокого напряжения все блоки электростанции связаны между собой системами сборных шин. От систем сборных шин по линиям электропередачи осуществляется связь с другими электростанциями и с потребителями. Все электростанции Европейской части и Урала работают параллельно, роторы генераторов вращаются синхронно, т.е. поворачиваются одновременно на один и тот же угол. Изменение нагрузки потребителей воспринимается частотоведущими электростанциями или блоками КЭС.

Часть выработанной энергии расходуется для обеспечения работы самой электростанции (на собственные нужды): на привод многочисленных электронасосов, на подогрев мазута, на освещение. КПД современных КЭС составляет 38-40%. Это значит, что из всей энергии, заключенной в топливе, в лучшем случае в электроэнергию превращается до 40%. Остальная энергия уходит с водой, охлаждающей конденсаторы, и выбрасывается в дымовую трубу, рассеиваясь в окружающую среду,

Для сравнения показателей различных тепловых ЭС используют понятие условного топлива. Условное топливо — это топливо, имеющее теплотворную способность

$$Q = 7\,000 \text{ ккал/кг} = 29,33 \text{ МДж/кг.}$$



Удельные расход топлива зависят от работы агрегатов электростанции, в среднем он составляет 300-350 г условного топлива на 1 выработанный кВт·ч электроэнергии.

В 1999 г. ТЭС АОЭнерго России выработали 517,53 млрд кВт·ч электроэнергии при среднем удельном расходе  $b_{уд} = 341,7$  г/кВт·ч. Следовательно, для этого пришлось сжечь

$$V_T = 341,7 \cdot 10^{-6} \cdot 517,53 \cdot 10^6 \text{ т} = 176,8 \text{ млн т. у. т.}$$

За сутки Рефтинская ГРЭС на Урале вблизи Екатеринбурга мощностью 3 800 МВт сжигает при  $b_{уд} = 336,5$  г/кВт·ч.

Тогда

$$V_T = 336,5 \cdot 10^{-6} \cdot 3800 \cdot 10^3 \cdot 24 = 30700 \text{ т} \approx 511 \text{ вагонов по } 60 \text{ т угля.}$$

В энергоблоке 1200 МВт Костромской ГРЭС за 1 с испаряется в котле, проходит через турбину и конденсируется более 1 т воды.

### 3.2. Теплоэлектростанции

Другим видом ТЭС являются ТЭЦ, их сооружают вблизи больших потребителей тепловой энергии. Первым и основным назначением ТЭЦ является выработка тепловой энергии, которая расходуется в виде пара и горячей воды чаще всего в городах или на территориях больших промышленных предприятий. Вторым назначением ТЭЦ является выработка электроэнергии.

Отличие ТЭЦ от ГРЭС заключается в том, что на ГРЭС отбор пара из турбины производится на собственные нужды (см. рис. 3.2) для подогрева питательной воды, для отопления, а на ТЭЦ отбор пара, например 6 атм, осуществляется в больших количествах и направляется по трубопроводам на производственные предприятия. Некоторые турбины на ТЭЦ могут работать только для снабжения пара потребителям (турбины с противодавлением). Такие турбины работают без конденсаторов. Второе отличие ТЭЦ заключается в том, генераторы работают на сборные шины генераторного напряжения, с которых осуществляется питание ближайших потребителей электроэнергии. Третье отличие ТЭЦ связано с тем, что пар на выходе парогенераторов подается в общий коллектор, из которого пар поступает к турбинам. Таким образом, можно выводить в ремонт любой котел независимо от работы турбогенераторов. В основном технологический процесс выработки тепловой и электрической энергии на ТЭЦ и ГРЭС одинаков.

### 3.3. Газотурбинные установки

Использование природного газа и жидкого топлива, транспортируемых по трубопроводам от мест производства, позволило использовать в большой энергетике газотурбинные установки (рис. 3.3). Газотурбинные установки широко используются в самолетостроении на турбовинтовых авиационных двигателях.

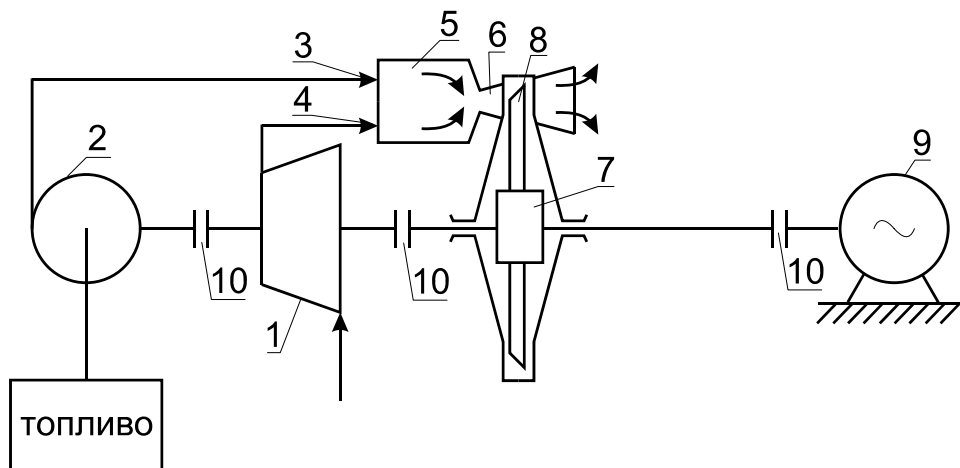


Рис. 3.3. Газотурбинная электростанция:

- 1 — компрессор; 2 — насос; 3, 4 — регулировочные клапаны;
- 5 — камера сгорания; 6 — сопло; 7 — ротор газовой турбины;
- 8 — лопатки газовой турбины; 9 — электрогенератор;
- 10 — соединительные муфты

В таких установках топливо газ (в самолетах — самолетный керосин) насосом 2 через регулировочный клапан 3 под давлением подается в камеру сгорания 5. В эту же камеру подается через регулировочный клапан 4 предварительно сжатый компрессором 1 воздух. В камере сгорания 5 топливо сгорает в присутствии воздуха, газовая смесь расширяется и через направляющие аппараты сопла 6 поступает на лопатки 8 газовой турбины 7. Отработавшие газы выбрасываются в атмосферу (показано стрелками). Ротор газовой турбины 7 вращает компрессор воздуха 1 и топливный насос 2. С другой стороны через муфту 10 ротор газовой турбины вращает ротор синхронного генератора 9. Электроэнергия от генератора поступает к потребителям через линии электропередачи и трансформаторы. Значительная часть энергии топлива, отработав в газовой турбине выбрасывается в атмосферу. Кроме этого энергия, заключенная в топливе, расходуется на вращение компрессора 1 и топливного насоса 2, поэтому КПД таких установок несколько ниже конденсационных электростанций.

Но газотурбинные установки имеют меньшие капитальные затраты. Такие установки монтируют на железнодорожных платформах, что позволяет их транспортировку в любую точку страны.

### 3.4. Парогазовые установки

Более экономичными тепловыми электростанциями для выработки электроэнергии служат парогазовые установки, которые заменят традиционные КЭС. Парогазовыми называются энергетические установки, в которых теплота уходящих газов газовой турбины используется для выработки электроэнергии в паротурбинном цикле. На рисунке 3.4 показана схема простейшей парогазовой установки (ПГУ) утилизационного типа.

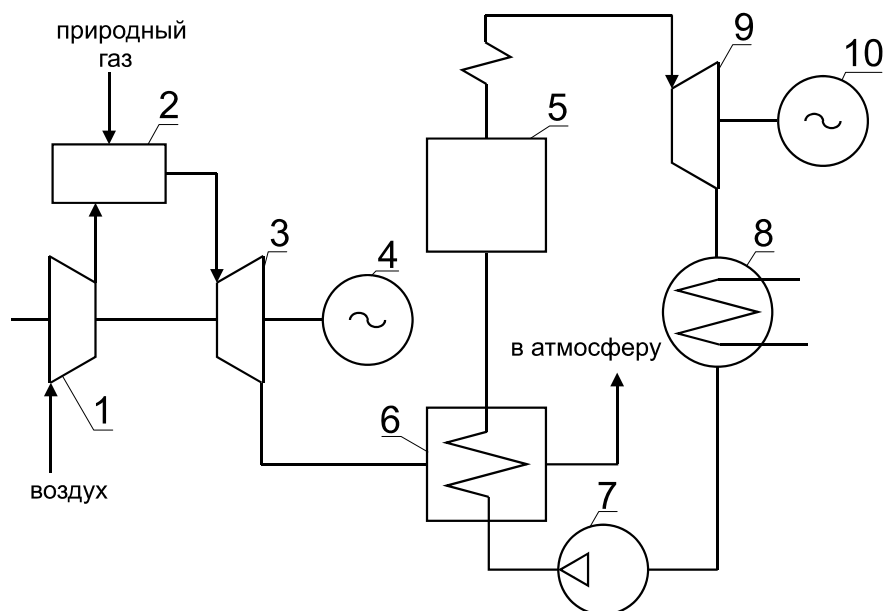


Рис. 3.4. Структурная схема парогазовой установки:

- 1 — воздушный компрессор; 2 — смеситель топливо-воздух;  
 3 — газовая турбина; 4 — первый генератор; 5 — испаритель;  
 6 — котел-утилизатор; 7 — питательный насос; 8 — конденсатор;  
 9 — паровая турбина; 10 — второй генератор

Поступающий воздух предварительно сжимается компрессором 1 и смешивается с поступающим газом в смесителе 2. Газовоздушная смесь поступает в газовую турбину 3, где при сгорании расширяется и приводит в движение ротор. На одном валу с ротором газовой турбины установлен с одной стороны компрессор для воздуха 1, а с другой стороны — генератор 4 газотурбинной установки (ГТУ). Отработавшие в газовой турбине газы поступают в котел-утилизатор 6. В этом котле вода, подаваемая питательным

насосом 7 нагревается, в испарителе 5 превращается в пар, а затем пар перегревается. Перегретый пар поступает в паровую турбину 9, с валом которой соединен ротор генератора 10 паротурбинного цикла. Отработавший в паровой турбине пар охлаждается в конденсаторе 8, а затем питательным насосом 7 подается в котел-утилизатор. Таким образом, ПГУ утилизационного типа имеет два генератора. КПД таких установок достигает 53-60%. Такие ПГУ установки находятся в эксплуатации на Западе с 1979 года.

### 3.5. Атомные электростанции

Функции АЭС такие же, как и у ГРЭС. На атомных электростанциях в качестве топлива используют ядерное горючее Уран 235 ( $^{235}\text{U}$ ). Один кг  $^{235}\text{U}$  заменяет 2 900 т угля. Отработавшее ядерное топливо необходимо утилизировать на специальных заводах.

На рисунке 3.5 представлена упрощенная структурная схема АЭС с водо-водяным энергетическим реактором.

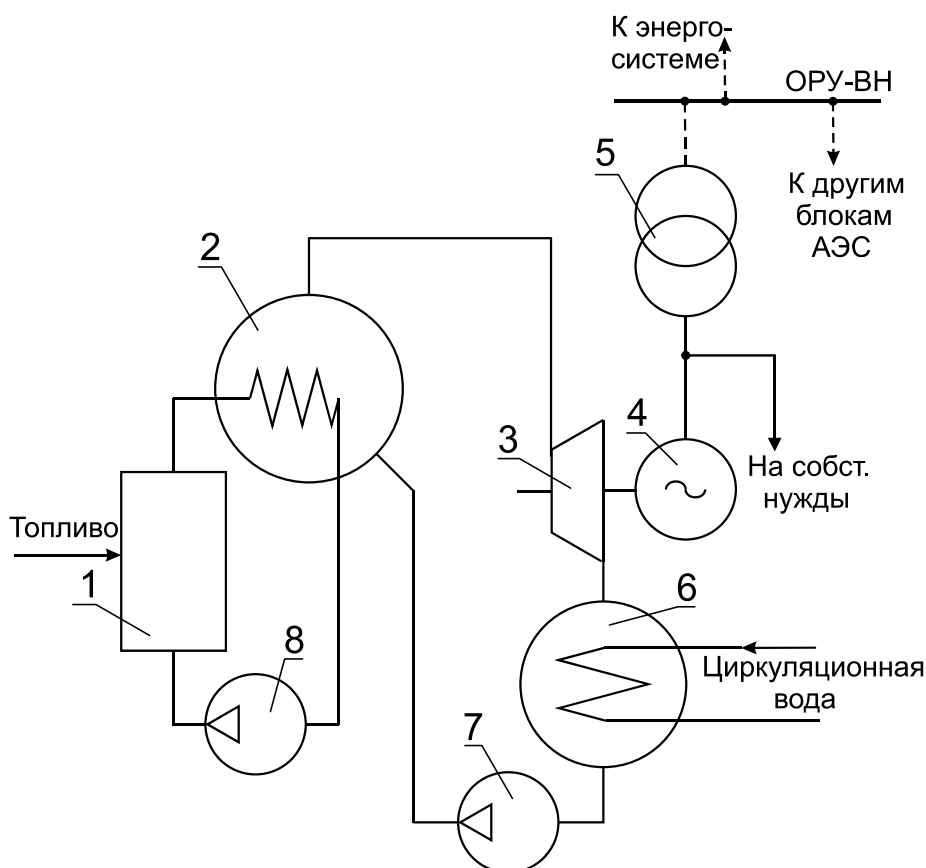


Рис. 3.5. Двухконтурная АЭС

1 — реактор; 2 — парогенератор; 3 — турбина;  
4 — генератор; 5 — трансформатор; 6 — конденсатор;  
7 — питательный насос; 8 — главный циркуляционный насос

В атомном реакторе 1 за счет деления ядер урана выделяется большое количество тепла. Это тепло нагревает воду в первом контуре, в котором вода прокачивается главным циркуляционным насосом 8 через парогенератор 2. В парогенераторе вода первого контура передает энергию воде второго контура. Для безопасности вода первого и второго контуров не соприкасаются между собой. Вода второго контура превращается в пар в парогенераторе.

Давление пара создается питательным насосом. Потенциальная энергия пара в турбине преобразуется в механическую. Лопастей турбины, расположенные на роторе, одновременно вращают ротор электрогенератора 4. За счет магнитного потока ротора механическая энергия ротора преобразуется в электрическую и транспортируется потребителям через трансформаторы 5. Часть выработанной электроэнергии, как и на любой электростанции, используется на собственные нужды. Отбор энергии на собственные нужды показан стрелкой.

Эксплуатация атомных электростанций требует высокой культуры обслуживания. Незначительные отклонения в выполнении правил эксплуатации приводит к авариям, которые отражаются на жизни всей планеты.

### 3.6. Гидроэлектростанции

Гидравлическая энергия является возобновляемым источником энергии. Гидроэлектростанции (ГЭС) — это сложные инженерные сооружения, предназначенные для преобразования гидравлической энергии потока жидкости в электрическую. Основными сооружениями ГЭС являются:

- плотина, создающая водохранилище и обеспечивающая перепад уровней (напор);
- здание ГЭС, в котором размещены гидротурбины, генераторы, электрическое и механическое оборудование, обеспечивающее работу электростанции;
- водосбросные и судоходные сооружения;
- водозаборы для систем орошения и водоснабжения;
- рыбопропускные сооружения.

ГЭС используются только для выработки электроэнергии. Основная функция ГЭС — покрытие пиковых нагрузок, особенно в период с 8 до 11 часов, когда нагрузки максимальны.

Режим работы ГЭС зависит от расхода воды, напора, объема накопленной воды в водохранилище. Напором называется удельная потенциальная энергия потока жидкости, она численно равна падению уровня свободной поверхности водотока на данном участке. Участок реки между двумя соседними плотинами или шлюзами называется бьефом (рис. 3.6). Напор водотока определяется разностью уровней воды в верхнем  $Z_{В.Б}$  и нижнем  $Z_{Н.Б}$  бьефе.

$$H_{ВОД} = Z_{В.Б} - Z_{Н.Б}.$$

Расходом воды  $Q$  ( $\text{м}^3/\text{с}$  или  $\text{л}/\text{с}$ ) называется количество воды, проходящей через поперечное сечение водотока.

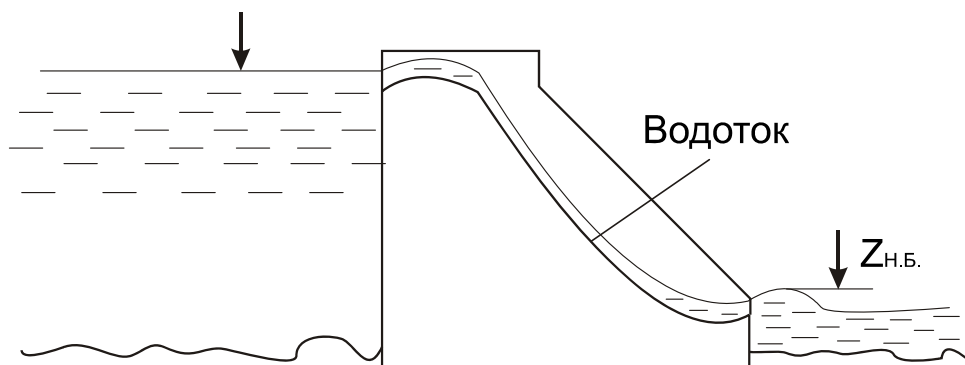


Рис. 3.6. Уровень воды в верхнем и нижнем бьефах

Теоретически мощность водотока на данном участке может быть определена по формуле

$$N_{ВОД} = \rho g Q_{ВОД} H_{ВОД} = 9,81 Q_{ВОД} H_{ВОД},$$

где  $\rho$  — плотность жидкости, принимается  $\rho = 1\,000 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;

$g$  — ускорение свободного падения, в средней полосе России  $g = 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$ , на юге страны  $g = 9,782 \text{ м}/\text{с}^2$ .

Включение и отключение агрегатов ГЭС, регулирование нагрузки осуществляется автоматически путем регулирования расхода. Для включения остановленного гидроагрегата и напора полной нагрузки требуется всего 1...2 мин, тогда как для включения блока на КЭС требуется около 20 часов.

Мощность на валу гидротурбины (рис. 3.7) определяется как

$$N_T = 9,81 Q_T H_T \eta_T,$$

где  $Q_T$  — расход воды через гидротурбину,  $\text{м}^3$ ;

$H_T$  — напор турбины, м;

$\eta_T$  — коэффициент полезного действия турбины. В современных гидротурбинах  $\eta_T = 0,92...0,95$ . Мощность гидротурбины регулируется расходом воды.

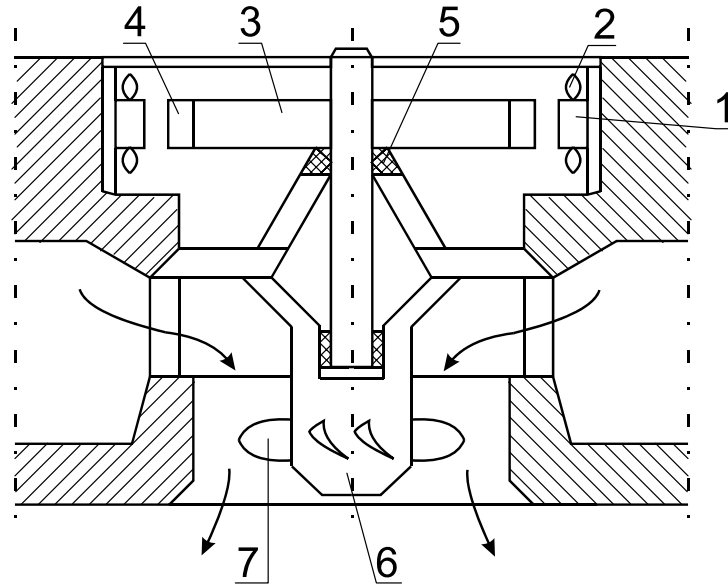


Рис. 3.7. Гидротурбина с генератором:  
 1 — статор генератора; 2 — обмотка статора;  
 3 — ротор генератора; 4 — обмотка ротора; 5 — опорный подшипник; 6 — гидротурбина; 7 — лопатки турбины

Напор турбины равен

$$N_T = \Delta BB - \Delta NB - \Delta h = N_{ГЕОМ} - \Delta h,$$

- где  $\Delta BB$  — уровень воды в верхнем бьефе (в водохранилище);  
 $\Delta NB$  — уровень воды в нижнем бьефе, в реке после прохождения через ГЭС;  
 $\Delta h$  — потери напора в водоподводящем тракте,  $\Delta h$  составляют 2...3% от  $N_{ГЕОМ}$ .

Электрическая мощность гидроагрегата на выводах генератора равна

$$N_{ГЕН} = N_T \eta_G,$$

где  $\eta_G$  — КПД генератора,  $\eta_G = 0,9...0,98$

Количество выработанной электроэнергии за промежуток времени  $T$  определится при изменяющейся мощности  $N_{ГЕН}$ :

$$W_{эл} = \int_0^T N_{ГЕН.i} dt.$$

Стоимость выработки электроэнергии в 6...8 раз ниже, чем на ТЭС и АЭС, но капитальные затраты на сооружение ГЭС намного больше.

Все электростанции объединены в между собой в энергетическую систему линиями электропередачи на напряжениях 220 кВ и выше, поэтому изменение нагрузки потребителей сказывается на

работе всех электростанций. Между электростанциями нагрузка перераспределяется по графику работы энергосистемы. Центральное диспетчерское управление и диспетчеры энергосистем следят за частотой напряжения и перераспределяют нагрузку между электростанциями так, чтобы стоимость выработки и стоимость передачи электроэнергии были наименьшими. Частоту 50 Гц в энергосистемах поддерживают ГЭС, способные быстро изменять нагрузку и следить за потреблением электроэнергии.

Особое место в электроэнергетике занимают гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС) [7]. ГАЭС имеют горизонтально расположенный гидроагрегат, который выполняет функции генератора и функции насоса. В ночное время, когда нагрузки снижаются, гидроагрегат потребляет электроэнергию из сети и работает как насос, поднимая воду из нижнего бьефа в верхний. В дневное время, когда нагрузки максимальные, гидроагрегат вращается под напором воды, протекающей из верхнего бьефа в нижний, и вырабатывает электроэнергию. В России работает Загорская ГАЭС мощностью 1 200 МВт.

### **3.7. Резервные электростанции**

Для увеличения надежности электроснабжения ответственных потребителей, не допускающих перерыва в электроснабжении (потребители первой категории по надежности электроснабжения), используются резервные электростанции. Резервные электростанции могут быть стационарными или передвижными. Резервные электростанции запускаются вручную или автоматически при исчезновении основного электропитания. Особенно это актуально для птицефабрик, перерыв электроснабжения которых приводит к массовому падежу птицы. Резервные электростанции содержат первичный двигатель с запасом топлива и генератор с возбудителем. Первичным двигателем обычно является двигатель внутреннего сгорания (ДВС), который вращается с частотой 1 500 об/мин или 3 000 об/мин. Синхронный генератор имеет одну или две пары полюсов и чаще всего размещен на одном валу с ДВС [8].

Резервные электростанции старого типа на сельскохозяйственных предприятиях подключаются к потребителям через перекидной рубильник QS, чтобы исключить появление высокого напряжения на трансформаторе Т во время ремонтных работ в сетях 0,38 или 10 кВ (рис. 3.8).



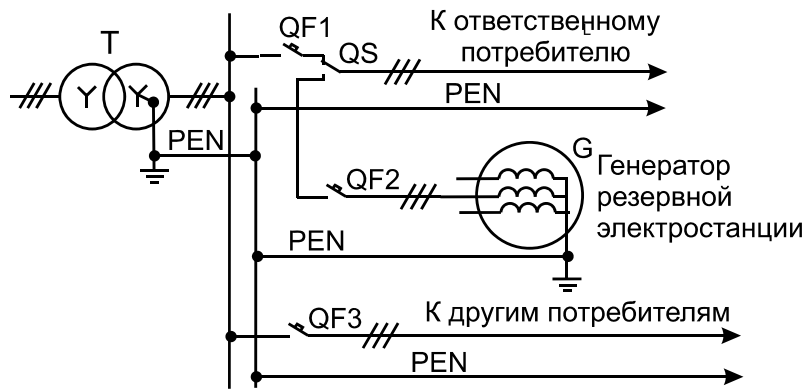


Рис. 3.8. Подключение резервной электростанции

У современных резервных электростанций вместо перекидного рубильника используются реверсивные контакторы. При исчезновении основного питания со стороны трансформатора информация об отсутствии напряжения поступает на контроллеры, которые автоматически запускают первичные двигатели внутреннего сгорания и подают возбуждение в генератор. После достижения на выводах генератора номинальной частоты и напряжения генератор резервной электростанции подключается к ответственному потребителю.

В связи с возрастанием тарифов на электроэнергию некоторые предприятия устанавливают собственные электростанции мощностью до нескольких МВт. Например, на тепличном комбинате, в цехах которого выращиваются круглый год овощи и цветы, газопоршневой двигатель вращает синхронный генератор мощностью 900 кВт. Охлаждающая двигатель внутреннего сгорания вода используется для обогрева теплиц. Ясно, что КПД такой электростанции даже выше, чем на ТЭЦ, а себестоимость выработки электроэнергии ниже. Такие генераторы могут работать параллельно с энергосистемой, поэтому перерыв питания потребителей сводится к минимуму.

### Контрольные вопросы

1. Проследите контур прохождения воды и пара в КЭС.
2. Чем отличается ТЭЦ от КЭС?
3. Как работает газотурбинная установка?
4. В чем преимущество парогазовых электростанций перед КЭС?
5. От чего зависит мощность гидрогенератора?
6. Для чего атомные электростанции выполняются двухконтурными?
7. Для чего необходимы резервные электростанции?
8. Как подключаются резервные электростанции к потребителям?

## **4. ТРАНСПОРТИРОВКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ОТ ИСТОЧНИКОВ К ПОТРЕБИТЕЛЯМ**

На электростанциях выработанная электрическая энергия транспортируется к потребителям. И транспортируется ее столько, сколько требуют потребители, кроме этого при транспортировке часть энергии теряется в проводах и трансформаторах, поэтому вырабатывается на электростанциях электроэнергии несколько больше, чем это необходимо для удовлетворения потребителей. Для снижения потерь энергии при передаче на большие расстояния используют трехфазные линии электропередачи и трехфазные трансформаторы и автотрансформаторы на напряжениях 220, 330, 500, 750, 1150 кВ. Такие высокие напряжения применяются с целью снижения не только энергии, но и снижения потерь напряжения. Кроме этого на таких напряжениях осуществляется связь электростанций и энергосистем между собой. Это исключает нарушение электроснабжения потребителей даже в случае аварийного выхода из строя самой мощной электростанции. Передача электроэнергии на большие расстояния обусловлена тем, что вырабатывается она на электростанциях с мощными электроагрегатами. Тенденция к концентрации мощностей генераторов и электростанций объясняется тем, что с их ростом снижаются относительные затраты на сооружение и уменьшается стоимость вырабатываемой энергии. Потребление же электроэнергии осуществляется сравнительно маломощными электроприемниками, распределенными на значительной территории. По этой причине электроэнергия от потребителя до источника проходит несколько ступеней трансформации, но начинается транспортировка электроэнергии от генераторов.

### **4.1. Принцип действия синхронного генератора**

Электрическая энергия на электростанциях вырабатывается в генераторах. В основном для выработки электроэнергии используют синхронный генератор (СГ) — это электромеханический преобразователь механической энергии в электрическую. Любой СГ содержит:

- статор, закрепленный на неподвижном основании (фундаменте);
- вращающийся в подшипниках ротор;
- подшипниковые щиты, которые соединяют подшипники ротора с торцами корпуса статора.

Синхронные генераторы устанавливаются на всех электростанциях, на передвижных установках и на большинстве транспортных средств. Синхронным генератор называется потому, что магнитное поле ротора и ЭДС (ток) в обмотке статора имеют одинаковую частоту. Генераторы в большинстве случаев выполняются трехфазными, чтобы получить трехфазную систему напряжений, под действием которой протекает трехфазный ток. Трехфазную энергию удобно передавать и преобразовывать в механическую и другие виды энергии у потребителей [6].

В корпусе статора закрепляют кольцевое железо из листов трансформаторной стали с пазами. В пазы железа статора укладывают трехфазную обмотку, фазы которой сдвинуты по расточке статора в пространстве на  $120^\circ$  градусов. В расточку статора вводят ротор, в пазы ротора укладывают обмотку, по которой пропускается постоянный ток. Ротор, железо статора и обмотки непрерывно охлаждаются в зависимости от конструкции генератора воздухом, водородом или/и водой.

Ротор СГ — это электромагнит, индуктор, который создает интенсивное магнитное поле. На ТЭС ротор имеет два полюса: северный, из которого выходят магнитные силовые линии, и южный, в который входят линии магнитного поля. Эти два полюса создают одну пару полюсов, число пар полюсов обозначается малой буквой  $p$ , на генераторах ТЭС  $p = 1$ . Ротор-индуктор вращается турбиной или другим первичным двигателем и по правилу правой руки наводит в обмотках статора ЭДС. Если ротор вращается по часовой стрелке, то неподвижные проводники обмотки статора, в которых наводится ЭДС, движутся относительно магнитного поля ротора против часовой стрелки. Направление ЭДС можно определить по правилу правой руки.

*Если силовые линии поля ротора входят в ладонь, большой палец показывает направление движения проводника в магнитном поле, то четыре пальца указывают направление ЭДС.*

На рисунке 4.1 наибольшая ЭДС наводится в витках фазы А, под этими витками магнитный поток имеет наибольшую индукцию (плотность). При повороте ротора на  $120^\circ$  в расточке статора максимальная ЭДС будет в витках обмотки фазы В, а еще через  $120^\circ$  — в витках обмотки фазы С. Один поворот ротора на  $360^\circ$  равен  $2\pi$  радиан ТЭС осуществляется за  $0,02$  с. Другими словами, период равен  $T = 0,02$  с, а частота (Гц) — величина, обратная периоду  $f = 1/T$ . Конструкция ротора и обмоток статора выполнены так, что наво-

димая в витках обмотки статора ЭДС изменяется по синусоидальному закону. Мгновенные значения ЭДС изменяются в зависимости от угла поворота ротора генератора  $\alpha = \omega t$ . Угол поворота ротора — это путь, равный произведению угловой скорости на время. Угловую скорость  $\omega$  выражают в радианах в секунду (рад/с). Поворот ротора на  $360^\circ$  происходит со скоростью  $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$ . Поворот ротора на произвольный угол  $\alpha$  происходит за время  $t$   $\alpha = \omega t$ , тогда значение ЭДС в произвольный момент времени

$$e = E_{\text{МАКС}} \sin \alpha = E_{\text{МАКС}} \sin \omega t.$$

Для получения частоты ЭДС и тока 50 Гц ротор необходимо вращать с частотой 3 000 об/мин, тогда

$$f = \frac{pn}{60} = \frac{1 \cdot 3000}{60} = 50 \text{ Гц},$$

где  $p$  — число пар полюсов.

У гидрогенераторов, например,  $p = 10$ , тогда для получения частоты 50 Гц необходимо вращать ротор генератора с частотой

$$n = \frac{60p}{50} = 300 \text{ об/мин.}$$

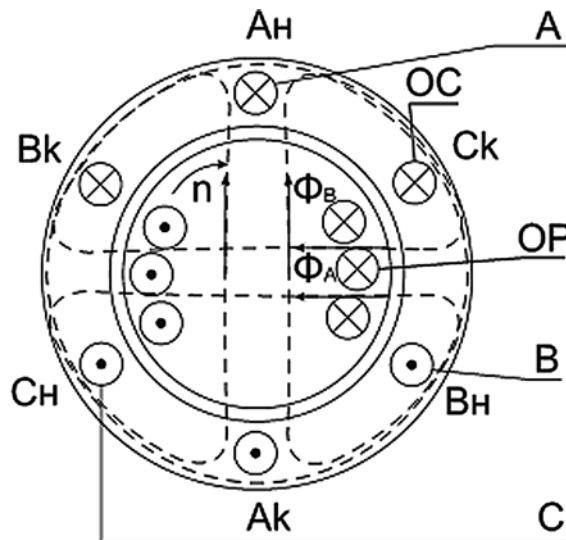


Рис. 4.1. Разрез статора с ротором синхронного генератора:  
ОС — обмотка статора; ОР — обмотка ротора

Обычно у статоров генераторов концы обмоток  $A_K, B_K, C_K$  соединяются вместе и образуют «звезду», а к началам обмоток через провода, обозначенные на рисунке А, В, С, подключается нагрузка. Когда к статору подключена активная нагрузка, то ток практически совпадает с по направлению с ЭДС.

Тогда три тока в витках  $B_K, A_H, C_K$  будут протекать «от нас», а в витках  $C_H, A_K, B_H$  — «к нам». Эти токи по правилу правоходового винта создают магнитный суммарный поток  $\Phi_A$  — поток реакции якоря. По правилу левой руки силовые линии потока реакции якоря заходят в ладонь, четыре пальца показывают направление тока в проводнике, а большой палец указывает направление силы. Сила направлена против вращения ротора. Значит, активная нагрузка тормозит ротор синхронного генератора.

Величина этого тока обмотки статора зависит от того, какая нагрузка включена. С увеличением нагрузки (тока статора) через частоту вращения ротора сигналы передаются на увеличение подачи топлива, воды и воздуха в котел. Мы, как потребители электроэнергии, определяем загрузку генераторов электростанций. Все генераторы электростанций работают синхронно, другими словами, их роторы одновременно поворачиваются на один и тот же угол. Частота вращения 50 Гц, что соответствует 50 об/мин роторов генераторов поддерживается автоматически количеством энергоносителей, поступающих в турбину. Отклонение частоты допускается  $\pm 0,2$  Гц.

#### 4.2. Фазные и линейные напряжения

Обмотки фаз статора синхронного генератора сдвинуты в пространстве на  $120^\circ$ , тогда максимумы ЭДС в каждой фазе сдвинуты по углу также на  $120^\circ$ , что соответствует  $2\pi/3$  радиан ( $360^\circ = 2\pi$ ). Так как максимальные ЭДС в каждой фазе одинаковые, то мгновенные значения ЭДС как функции угла поворота ротора в каждой фазе будут иметь значения [2]

$$e = E_{МАКС} \sin \omega t;$$

$$e = E_{МАКС} \sin \left( \omega t + \frac{2\pi}{3} \right);$$

$$e = E_{МАКС} \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right).$$

Фазные ЭДС — это напряжения на холостом ходу генератора между началом и концом обмоток  $U_{A_H-A_K}, U_{B_H-B_K}, U_{C_H-C_K}$ . Концы обмоток соединены в общую точку (в звезду), которая называется нулевой N. Тогда фазные напряжения можем записать, подразумевая под A, B, C начала обмоток  $U_{A-N}, U_{B-N}, U_{C-N}$ . В дальнейшем индекс N в фазных напряжениях опускают и получаем  $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$ . Представим фазные напряжения в виде векторов, сдвинутых друг относительно друга на  $120^\circ$  или  $2\pi/3$  радиан (рис. 4.2).

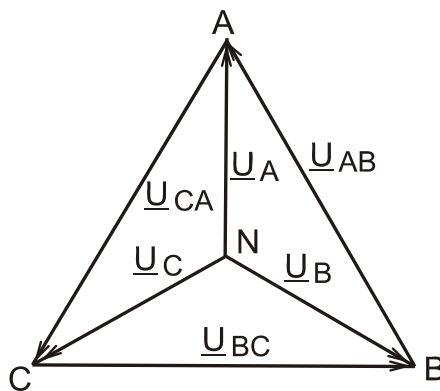


Рис. 4.2. Фазные и линейные напряжения

Если измерить напряжения между началами обмоток, то получим междуфазные напряжения, которые еще называют линейными. По величине линейные напряжения в  $\sqrt{3}$  раз больше фазных. Зная направление и величину векторов фазных напряжений нетрудно вычислить векторы междуфазных напряжений

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B, \quad \underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C, \quad \underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A.$$

Не следует забывать, что векторы вращаются против часовой стрелки, а на векторной диаграмме мы их как бы останавливаем в определенный момент времени. Мгновенные значения напряжений в этот момент времени определяются проекцией векторов на вертикальную ось.

Эти векторы напряжений преобразуются по величине во всех трансформаторах от источника до потребителя и поворачиваются во всех фазах на один и тот же угол в случае использования трансформаторов со схемой соединения обмоток «звезда – треугольник» или «звезда – зигзаг». После преобразований по величине и по углу напряжения поступают на выходные клеммы потребительского трансформатора, вторичная обмотка которого соединена в «звезду с нулевым проводом». Между нулевым проводом и фазными проводами получим фазные напряжения, мгновенные значения которых вычисляются по тем же формулам, что и ЭДС

$$\begin{aligned} u_A &= U_{\text{МАКС}} \sin \omega t; \\ u_B &= E_{\text{МАКС}} \sin \left( \omega t + \frac{2\pi}{3} \right); \\ u_C &= E_{\text{МАКС}} \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right). \end{aligned}$$

Если представить в виде векторов, то они сдвинуты друг относительно друга на  $120^\circ$ . На рисунке 4.2 изображены векторы, когда  $\omega t = \pi/2$ . При подключении нагрузки (сопротивлений) под действием этих напряжений будут протекать токи. Если подключим активно-индуктивную нагрузку, например, три одинаковые стиральные машины с асинхронными двигателями на разные фазные напряжения, то в каждой фазе ток будет отставать от соответствующего напряжения на угол  $\varphi$  (см. рис. 1.7). Часть напряжения каждой фазы будет теряться в питающих проводах, поэтому если на выводах трансформатора напряжение составляло 230 В, то на вводах электродвигателя напряжение будет, например, 220 В, но углы между векторами напряжений останутся прежние.

При несимметричной нагрузке углы между векторами фазных напряжений у потребителей могут отличаться от значения  $2\pi/3$ . Соответственно и линейные напряжения будут несимметричными.

### **4.3. Принцип работы однофазного трансформатора**

Особенностью электрической энергии является невозможность создания ее запасов. В любой момент времени, сколько электроэнергии требуют потребители, столько ее и вырабатывается на электростанциях. Но при передаче электроэнергии по пути ее следования существуют потери мощности, энергии и напряжения.

Поток электрической энергии, запрашиваемый потребителями путем включения и отключения сопротивлений, проходит через несколько трансформаторов и линий электропередачи различного уровня напряжения и доходит до генераторов электростанций. Без трансформаторов надо было на каждом предприятии или жилом поселке иметь свою электростанцию.

Трансформатор — это электрический аппарат, предназначенный для преобразования электрической энергии одного уровня напряжения в другой уровень напряжения. Трансформаторы могут быть понижающими и повышающими. Простейший однофазный двухобмоточный трансформатор содержит три основных элемента: первичную обмотку, к которой подводится питание от источника; вторичную обмотку, к которой подключается потребитель и магнитопровод. Обе обмотки наматываются на магнитопровод, этим самым обеспечивается между ними магнитная связь через магнитный поток, замыкающийся по магнитопроводу.

Рассмотрим принцип действия простейшего силового трансформатора. Силовым называется трансформатор потому, что он питает нагрузку, выполняющую работу посредством электрической или электромагнитной силы. Под действием напряжения, подведенного к первичной обмотке  $W_1$ , по ней протекает первичный переменный ток  $I_1$ , который создает переменный магнитный поток  $\Phi_{\text{ОСН}}$ . Магнитный поток  $\Phi_{\text{ОСН}}$ , замыкаясь по магнитопроводу, наводит во вторичной обмотке переменную ЭДС взаимной индукции  $E_2$ . При подключении нагрузки (сопротивления)  $Z_{\text{НАГР}}$  ко вторичной обмотке под действием  $E_2$  через обмотку и нагрузку протекает вторичный ток  $I_2$  (рис. 4.3).

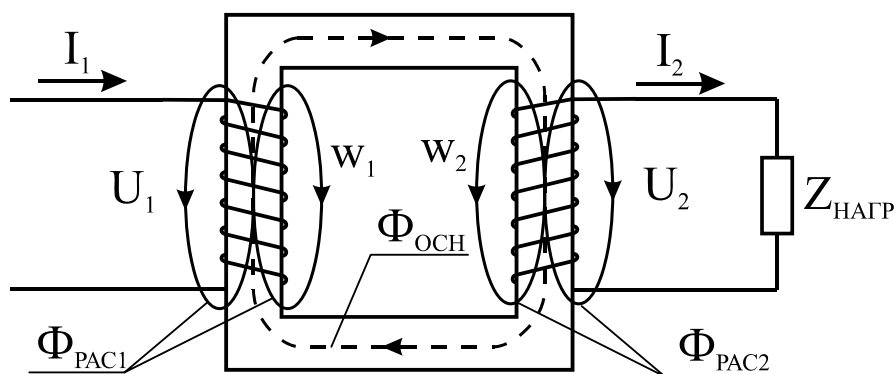


Рис. 4.3. Принцип работы однофазного трансформатора

Ввиду того, что вторичная обмотка имеет также сопротивление, то при протекании вторичного тока на вторичной обмотке устанавливается напряжение  $U_2$ , несколько меньше, чем  $E_2$ . На холостом ходу  $U_{2\text{ХХ}} = E_2$ . Отношение первичного напряжения ко вторичному на холостом ходу называется *коэффициентом трансформации силового трансформатора*:

$$\frac{U_{1\text{ХХ}}}{U_{2\text{ХХ}}} = K_T = \frac{U_1}{U_2}.$$

Нетрудно видеть, что со вторичной обмотки снимается вторичная мощность, равная произведению напряжения на ток

$$S_2 = U_2 I_2.$$

Трансформатор только преобразует электроэнергию, он ее не может вырабатывать. Из ничего не может возникнуть энергия. Коэффициент полезного действия современного трансформатора больше 99%, поэтому можем примерно утверждать, что какая мощность потребляется от трансформатора, такая же мощность должна подводиться к трансформатору от источника  $S_2 = S_1$ .



Но первичная мощность определяется также током и напряжением, поэтому при равенстве мощностей получаем  $U_2 I_2 = U_1 I_1$ .

Отсюда следует 
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1}.$$

*Пример.* Однофазные потребители подключены к однофазному силовому трансформатору 10/0,23 кВ. У такого трансформатора  $K_T \approx 43,5$ . При нагрузке на вторичной обмотке  $I_2 = 43,5$  А, ток в первичной обмотке будет  $I_1 = 1$  А. Если ток вторичной обмотки возрастет до  $I_2 = 87$  А, то в первичной обмотке ток возрастет до  $I_1 = 2$  А.

*Вывод.* У силового трансформатора во сколько раз изменяется вторичный ток, определяемый нагрузкой потребителей, во столько же раз пропорционально изменяется первичный ток.

При одинаковой плотности тока в первичной и вторичной обмотках  $j$ , А/мм<sup>2</sup>, сечение провода первичной обмотки у понижающего трансформатора во много раз меньше сечения провода вторичной обмотки. У повышающего силового трансформатора наоборот:

$$S_1 = \frac{I_1}{j}, \quad S_2 = \frac{I_2}{j}, \quad S_1 < S_2.$$

Для передачи электроэнергии на большие расстояния с целью экономии цветного металла, из которого изготавливаются провода, необходимо напряжение увеличивать. Тогда для передачи одинаковой мощности потребуется меньшее сечение проводов линии электропередачи, и можно увеличивать дальность передачи электроэнергии. По мере приближения к потребителю уровень напряжения в сети снижается до 380/220 В. Так, рекомендуемый радиус прокладки проводов на напряжении 0,38 кВ — 500 м; для прокладки проводов на 10 кВ — 15 км; для 35 кВ — 40 км.

#### 4.4. Трехфазные трансформаторы

В электрических сетях однофазные трансформаторы применяются при передаче мощности до 10 кВА. Если три однофазных трансформатора объединить тремя стержнями, то получим трехфазный трансформатор. У такого трансформатора магнитопровод содержит три стержня, расположенные в одной плоскости. Стержни соединяются между собой одним ярмом сверху и одним ярмом снизу. На каждом стержне располагается первичная и вторичная обмотки. Магнитопровод с обмотками обычно погружают в бак с трансформаторным маслом для обеспечения хорошей изоляции между обмотками, между витками обмоток, а также для охлаждения за счет циркуляции масла. Нагретое у обмоток масло поднимается вверх, у стенок бака охлаждается и опускается вниз. Реже используются сухие трансформаторы с воздушным охлаждением обмоток.

Начала и концы обмоток высшего напряжения обозначаются прописными буквами А -Х, В – У, С – Z, а выводы обмоток низшего напряжения обозначаются а – х, b – у, с – z. Обмотки одного напряжения соединяются «звездой» или «треугольником». Такие соединения обозначаются Y или Δ. Обозначение Y/Δ соответствует соединению обмотки одного напряжения в «звезду», а другой в «треугольник».

Чтобы не устанавливать отдельный трансформатор на каждое рабочее напряжение, экономически выгодно на одном трансформаторе иметь несколько вторичных обмоток с различным числом витков. На районных подстанциях электрических сетей устанавливают трансформаторы 110/35/10 кВ с соединением обмоток Y/ Y/Δ. Такие трансформаторы называются трёхобмоточными.

#### 4.5. Система передачи электроэнергии

К большинству потребителей электроэнергия поступает от генераторов энергосистем через несколько трансформаторов. Каждый трансформатор рассчитывается на пропуск полного потока мощности, поэтому установленная мощность всех трансформаторов энергосистем всегда намного больше мощности генераторов. От места выработки электроэнергии на генераторах электростанций уровень напряжения в трансформаторах сначала увеличивается, чтобы уменьшить потери мощности, энергии и напряжения в сетях. Все генераторы электростанций объединены между собой в единую систему на высоком напряжении  $U_{\text{СИС}} = 220 \dots 750$  кВ. Часть потребителей вблизи электростанций получает электроэнергию с от распределительного устройства генераторного напряжения  $PU_{\text{ГЕН}}$ . Высокое напряжение 10...750 кВ через несколько трансформаторов уменьшается до значения, удобного для использования потребителями. Большинство сельскохозяйственных потребителей необходимо два уровня напряжения 380 и 220 В. Эти напряжения потребители получают примерно по следующей логической цепочке преобразования напряжения (кВ) от генераторов энергосистем:

$$20 \Rightarrow 500 \Rightarrow 220 \Rightarrow 110 \Rightarrow 35 \Rightarrow 10 \Rightarrow 0,38/0,22.$$

В этой логической цепочке прослеживается 6 ступеней трансформации. Опуская промежуточные преобразования напряжения, покажем подключение потребителей к электрической системе (рис. 4.4).

Дополнительные нагрузки (осветительные, нагревательные приборы и др.) к сети напряжением 380 В подключаются параллельно существующим. Это приводит к уменьшению общего сопротивления нагрузки потребителей и увеличению тока на стороне низкого напряжения трансформатора  $T_n (I_{\text{НН}})$ .

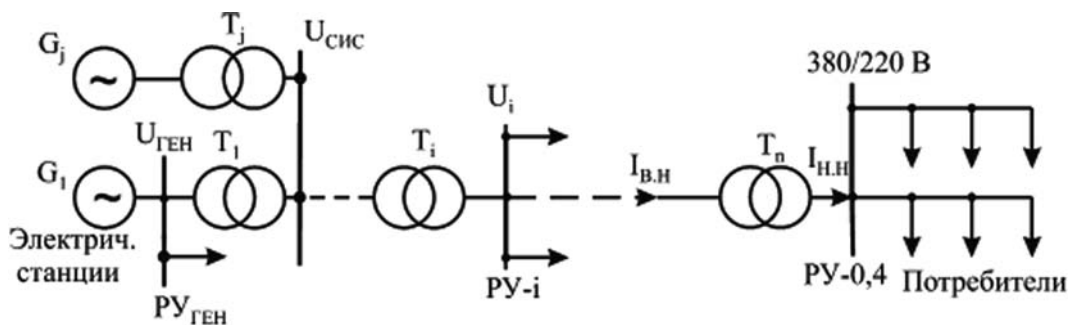


Рис. 4.4. Система передачи электроэнергии потребителям

Соответственно увеличивается ток на стороне высокого напряжения трансформатора  $T_n$  ( $I_{ВН}$ ). Если ток на стороне 0,4 кВ трансформатора увеличился на 100 А, то на стороне 10 кВ ток увеличится с учетом коэффициента трансформации 10/0,4 на 4 А. Это объясняется принципом действия этого аппарата. Первичная и вторичная обмотки двухобмоточного трансформатора рассчитываются на пропуск одного и того же потока мощности. Без учета потерь энергии в обмотках и магнитопроводе преобразование энергии в трансформаторе происходит в соответствии с формулой полной трехфазной мощности для каждой обмотки. Потери активной и реактивной мощностей в трансформаторе составляют несколько процентов, поэтому можно приближенно считать, что мощность, подключенная ко вторичной обмотке  $S_{нагр.2}$ , равна мощности, подводимой к первичной обмотке  $S_{нагр.1}$ :

$$S_{нагр.1} = S_{нагр.2} = \sqrt{3} U_{Л1} I_{нагр.1} = \sqrt{3} U_{Л2} I_{нагр.2},$$

где  $S_{нагр.1}, S_{нагр.2}$  — мощности нагрузок трансформатора;

$I_{нагр.1}, I_{нагр.2}$  — токи нагрузки, протекающие по обмоткам трансформатора

$U_{Л1}, U_{Л2}$  — линейные (междуфазные  $U_{МФ}$ ) напряжения между выводами обмоток трансформатора.

Когда трехфазные обмотки высокого и низкого напряжений трансформатора соединены по схемам «звезда – звезда», то коэффициент трансформации равен отношению числа витков обмоток высокого и низкого напряжения  $W_1$  и  $W_2$  с учетом того, что

$$U_{Л} = U_{МФ} = \sqrt{3} U_{\Phi}$$

$$K_m = U_{Л1}/U_{Л2} = U_{\Phi1}/U_{\Phi2} = I_{нагр.2}/I_{нагр.1} = W_1/W_2,$$

где  $U_{\Phi1}, U_{\Phi2}$  — фазные напряжения на обмотках трансформатора.

Из приведенных формул следует, что при протекании одного и того же потока мощности с увеличением напряжения ток в обмотке уменьшается. Это позволяет использовать меньшие сечения проводов обмотки. Уменьшаются и габариты трансформаторов. Снижение тока позволяет уменьшить и сечение проводов линий электропередачи, что удешевляет передачу электроэнергии на большие расстояния.

При подключении нагрузки ко вторичной обмотке потребительского трансформатора через промежуточные трансформаторы ток преобразуется и, в конечном итоге, с уменьшением сопротивления нагрузки увеличится ток, вытекающий из обмотки статора генератора. Отсюда следует, что изменение нагрузки у потребителей оказывает влияние на работу генераторов электростанций.

#### 4.6. Выбор сечения проводов

Потребители электроэнергии имеют разные сопротивления. Чтобы обеспечить длительную работу потребителей, необходимо их подключать к источнику (розетке, патрону) такими проводами, у которых температура изоляции не превышала определенные значения. Выбор сечения проводов осуществляется несколькими способами: по допустимой потере напряжения, по экономическим интервалам, по экономической плотности тока. Но наибольшее распространение получил способ выбора сечений проводов по допустимому нагреву. Этот способ самый простой, но для его применения необходимо иметь таблицы допустимых токовых нагрузок на провода, которые приводятся в Правилах устройства электроустановок (ПУЭ).

В проводниках с током по закону Джоуля-Ленца выделяется тепловая энергия:

$$W = I_{НАГР}^2 R_{ПР} t.$$

Величина выделившегося тепла пропорциональна квадрату протекающего тока. Предельная температура, до которой допускается нагрев в зависимости от типа изоляции и способов прокладки проводов, составляет 65 и 70° С. В таблицах для выбора сечений проводов по нагреву приведены длительные допустимые токи в зависимости от сечения, материала, способов прокладки (табл. 5) [5].

Выбор сечения проводов по этому методу очень простой, для этого необходимо выполнить условие

$$I_{ТАБЛ} = I_{ДОП} \geq I_{РАСЧ},$$

где  $I_{РАСЧ}$  — расчетный ток на участке сети.

Таблица 5. Допустимый длительный ток для проводов и шнуров с поливинилхлоридной и резиновой изоляцией

Сечение жилы, мм <sup>2</sup>	Токовые нагрузки, А, на провода									
	Проложены открыто		Проложены в трубе							
	С медными жилами	С алюминиевыми жилами	С медными жилами		С алюминиевыми жилами		С медными жилами		С алюминиевыми жилами	
		Два одножильных	Четыре одножильных	Один трехжильный	Два одножильных	Четыре одножильных	Один трехжильный	Два одножильных	Четыре одножильных	Один трехжильный
0,5	11									
0,75	15									
1	17	–	14	14						
1,5	20	–	15	14,5						
2,0	26		20	19						
2,5	30	24	25	21	20	19				16
4,0	41	32	30	27	28	23				21
6,0	50	39	40	34	36	30				26
10,0	80	60	50	50	50	39				38
16,0	100	75	75	70	60	55				55
25,0	140	105	90	85	85	70				65

Если в комнате одновременно включаются на 220 В компьютер  $P_K = 300$  Вт, утюг  $P_Y = 1200$  Вт и лампа  $P_L = 100$  Вт, то общий потребляемый ток равен

$$I_{РАСЧ} = (P_K + P_Y + P_L)/U_{НОМ} = \\ = (300 + 1200 + 100)/220 = 7,3 \text{ А.}$$

Такой ток способен пропустить медный провод сечением  $2 \text{ мм}^2$ , у которого  $I_{ДОП} = 20$  А. Меньшее сечение не допускается по механической прочности проводов при монтаже.

Из таблицы 5 следует, что алюминиевые провода сечением менее  $2,5 \text{ мм}^2$  не выпускаются по механической прочности. Величина допустимого тока зависит от условий охлаждения. При открытой прокладке проводов в воздухе допустимый по нагреву ток наибольший. В трубах условия охлаждения ухудшаются, поэтому допустимые токи снижаются.

Таблица 5 составлена для температуры окружающей среды  $15^\circ\text{C}$ . С увеличением температуры среды токовые нагрузки необходимо снижать. Для других сечений проводов и кабелей необходимо пользоваться таблицами, приведенными в ПУЭ.

#### 4.7. Простейшие защиты электрических сетей

Если для защиты электропроводки в квартире установлен автоматический выключатель с номинальным током 16 А, то необходимо прокладывать медные провода сечением не менее  $2,0 \text{ мм}^2$ , а алюминиевые —  $2,5 \text{ мм}^2$ . Тогда при перегрузках раньше сработает автоматический выключатель, чем расплавится изоляция проводов. По этой причине для слаботоковых потребителей, запитанных сечением медных проводов, например  $1 \text{ мм}^2$ , желательно устанавливать защиту с меньшим током, что и выполняется при подключении компьютеров.

Несколько квартир невозможно подключить к проводнику сечением  $2,5 \text{ мм}^2$ , поэтому по мере приближения к источнику питания (трансформатору) сечение проводов следует увеличивать, иначе их изоляция будет перегреваться при подключении нагрузок.

В соответствии с законом Джоуля-Ленца обеспечивается защита электрических сетей от перегрузок. Простейшая и пока самая распространенная защита осуществляется предохранителями с плавкими вставками. Плавкая вставка — это умышленное снижение сечения провода в заранее известном месте. В месте снижения сечения проводника сопротивление возрастает, и при увеличении тока сверх допустимого для плавкой вставки проводник внутри предохранителя

разрушится от выделившегося тепла. Тогда обслуживающий персонал проверяет целостность плавкой вставки, осматривает проводники, находит и ликвидирует место повреждения (например, короткое замыкание), затем устанавливает предохранитель с исправной плавкой вставкой и восстанавливает электроснабжение.

В отличие от предохранителей с плавкими вставками, которые являются аппаратами однократного действия, используют автоматические воздушные выключатели (на жаргоне электриков — автоматы). Автоматы — аппараты многократного действия, они могут разрывать цепи при перегрузках несколько сотен раз. Автомат чаще всего имеет два расцепителя, действующих на одну отключающую планку выключателя. Один расцепитель электромагнитный представляет собой электромагнит с подвижным сердечником. Большой ток, протекающий по обмотке электромагнита, втягивает сердечник, который воздействует на отключающую планку выключателя. Вторым расцепителем — электротепловым. При токах, превышающих длительно допустимый для теплового расцепителя, его биметаллическая пластина при нагреве изгибается и воздействует на отключающую планку выключателя.

#### *Контрольные вопросы*

1. Для чего через обмотку ротора генератора пропускают постоянный ток?
2. Почему генераторы называют синхронными?
3. Как определить направление ЭДС в витках обмотки статора?
4. Опишите принцип действия синхронного генератора.
5. Чем обеспечивается сдвиг по времени между фазными ЭДС в  $120^\circ$ ?
6. Нарисуйте «звезду» фазных и «треугольник» линейных напряжений.
7. Опишите принцип действия однофазного трансформатора.
8. Что такое коэффициент трансформации трансформатора?
9. Для чего в электрической сети устанавливают повышающие и понижающие трансформаторы?
10. Как выбрать сечение проводов по допустимому току?
11. Опишите принцип действия предохранителя с плавкой вставкой.
12. Принцип действия автоматического выключателя.

## 5. ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Сельскохозяйственные предприятия и бытовые потребители, как и все отрасли энергетики, не могут существовать без энергетического топлива. Топливом считается всякое вещество, выделяющее при определенных условиях большое количество тепловой энергии, которую используют в различных отраслях народного хозяйства. По принципу освобождения энергии топливо можно разделить на две группы:

- горючее, выделяющее теплоту при взаимодействии с окислителем;
- ядерное, которое выделяет теплоту в результате расщепления вещества топлива с одновременным образованием молекул других химических элементов.

Горючее топливо делят на органическое и неорганическое. Органическое топливо содержит углеводородные химические соединения: углерод, водород и их смеси. Неорганическим топливом являются неорганические вещества, которые при соединении с окислителем выделяют большое количество тепла. Это могут быть металлы: алюминий, магний, железо и др. Чтобы горючее вещество выделило теплоту, необходима его реакция с окислителем. В качестве окислителя может использоваться чистый кислород ( $O_2$ ), его модификации ( $O_2$ ,  $O_3$ ), азотная кислота ( $HNO_3$ ), перекись водорода ( $H_2O_2$ ). Чаще всего в энергетических установках в качестве окислителя используют воздух, содержащий 21% (по объему) кислорода.

Органическое топливо делят на ископаемое природное и искусственное. Ископаемое природное топливо накоплено в недрах Земли и являющееся продуктом биохимических и химических превращений органического вещества растений и микроорганизмов, существовавших на земле 0,5...500 млн лет назад. Искусственное топливо создано человеком путем переработки природных топлив с целью получения его новых наперед заданных свойств. Все горючие материалы на практике используются в качестве технологического или энергетического топлива.

### 5.1. Энергетическое топливо

*Энергетическим топливом* называются такие горючие вещества, которые экономически целесообразны при сжигании в технических устройствах для получения теплоты. В большинстве производств и в бытовом секторе в качестве энергетического топлива ис-



пользуют невозобновляемые источники энергии (рис. 5.1). Невозобновляемые — это такие источники, которые не могут возродиться в обозримом будущем. Невозобновляемые источники земли истощаются, что губительно сказывается на растительном, животном мире и на здоровье людей

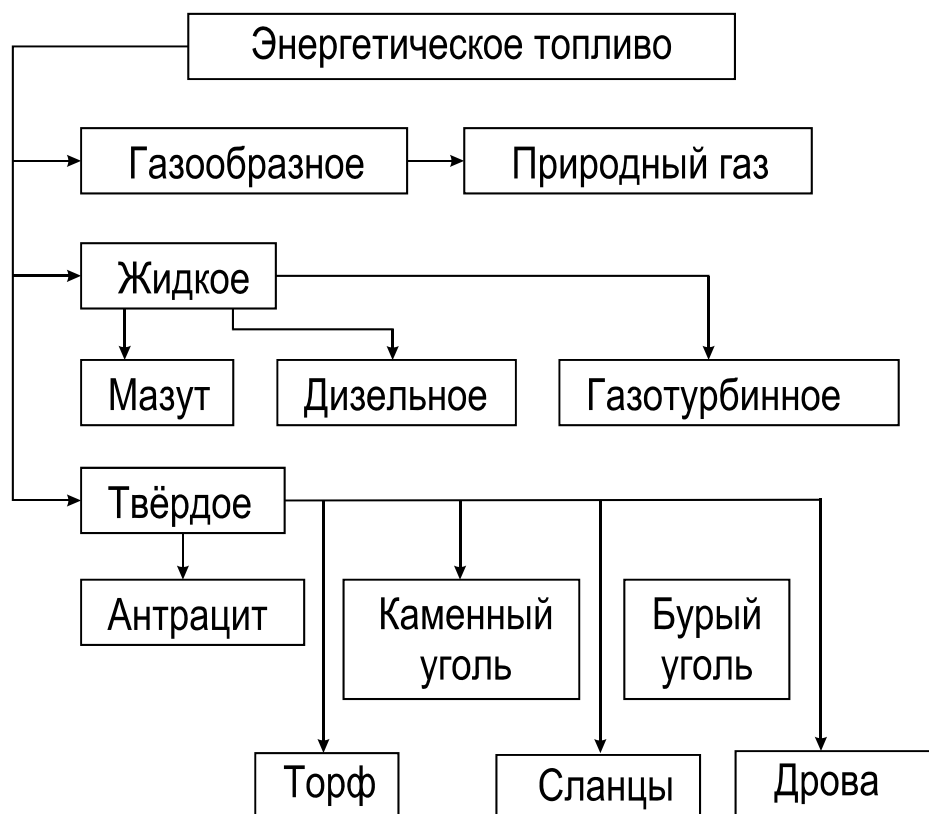


Рис. 5.1. Невозобновляемые источники энергии

Топливо должно удовлетворять таким условиям:

- 1) выделять при сгорании большое количество теплоты;
- 2) в продуктах сгорания должны отсутствовать компоненты, губительно влияющие на растительный, животный мир и на людей;
- 3) встречаться в природе или получаться из других веществ;
- 4) экономически целесообразно сжигать с учетом транспортировки от мест добычи до потребителя;
- 5) легко воспламеняться.

Топливо подразделяется на естественное и искусственное, получаемое путем переработки (табл. 6).

Таблица 6. Общая классификация топлива

Физическое состояние	Естественное	Искусственное
Твердое	Древесина, торф, бурый уголь, каменный уголь, антрацит, горючие сланцы	Древесный уголь, кокс, торфяные брикеты
Жидкое	Нефть	Мазут, дизельное и моторное топливо, керосин, бензин, спирт и др.
Газообразное	Природный газ, попутный нефтяной газ	Газы: доменный, генераторный, коксовый

В состав твердого и жидкого (органического) топлива входят горючие элементы и балласт. Горючие составляющие твердого и жидкого топлива: углерод С, водород Н, сера S образуют с кислородом и азотом сложные химические соединения.

Газообразное топливо представляет собой смесь различных компонентов. Нормальными стандартными условиями считают параметры: давление 101 325 Па, температура 293,16 К (20 °С). Для приведения объема газа  $V_t$  при давлении  $p_t$  и температуре  $t$  к стандартным условиям используют формулу

$$V_{20} = V_t \frac{(273 + 20) p_t}{(273 + t) p_0},$$

где  $V_{20}$  — объем газа при стандартных условиях, м<sup>3</sup>.

Основные составляющие природного и попутного газов — метан CH<sub>4</sub> (50...95%), этан C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, пропан C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, бутан C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, балластом являются углекислый газ CO<sub>2</sub>, водяные пары, различные смолы.

## 5.2. Тепловая энергия

При сгорании энергетических топлив выделяется тепловая энергия. Тепловая энергия, или теплота, — это форма движения мельчайших частиц тела. Теплота сгорания топлива показывает, какое количество теплоты (в килоджоулях) выделяется при полном сгорании при нормальных условиях. Теплота сгорания различных топлив различна, для сравнения их теплового действия введено понятие «условное топливо». Условным принято считать топливо, для которого теплота сгорания равна:

- для твердого и жидкого 29 300 кДж/кг (29,3 МДж/кг);
- для газообразного 29 300 кДж/м<sup>3</sup>.

Для перевода любого конкретного топлива в условное необходимо теплоту сгорания  $Q_{\text{кон}}$  разделить на 29 300 кДж/кг или 29 300 кДж/м<sup>3</sup>, полученное число — тепловой эквивалент умножить на массу этого топлива:

$$V_{\text{усл}} = V_{\text{кон}} \frac{Q_{\text{кон}}}{29\,300} = \mathcal{E}_T V_{\text{кон}},$$

где  $V_{\text{усл}}$  — масса условного топлива;  
 $V_{\text{кон}}$  — масса конкретного топлива;  
 $\mathcal{E}_T$  — тепловой эквивалент (табл. 7).

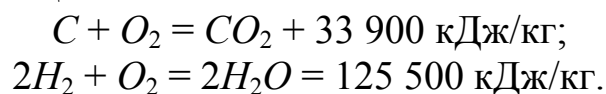
Таблица 7. Средние тепловые эквиваленты натурального топлива

Топливо	ЭТ	Топливо	ЭТ
Уголь подмосковный	0,38	Фрезерный торф	0,35
Уголь печорский	0,83	Кусковой торф	0,4
Уголь донецкий	0,9	Брикетированный торф	0,6
Уголь экибастузский	0,57	Дрова	0,26
Уголь норильский	0,78	Природный газ	1,2
Топочный мазут	1,37	Попутный газ	1,2
Дизельное топливо	1,43	Пропан сжиженный	3,1

Из таблицы 7 следует, что при сжигании 1 кг, например, топочного мазута получим  $Q_{\text{маз}} = 1,37 \cdot 29,3 = 40,14$  МДж тепла. Для получения такого же количества тепла необходимо сжечь 5,27 кг дров. Главная составляющая горючей части топлива — углерод. Теплота сгорания углерода — 33 650 кДж/кг. Вторым важным горючим компонентом топлива является водород, теплота сгорания которого около 142 000 кДж/кг. Теплота сгорания серы 9 000 кДж/кг, но при ее сгорании образуются окислы  $\text{SO}_2$  и  $\text{SO}_3$ , вызывающие коррозию поверхностей нагрева котлоагрегатов, а при попадании с дымовыми газами в атмосферу загрязняют окружающую среду [10].

При полном горении горючие компоненты топлива окисляются кислородом воздуха. Чтобы топливо начало гореть, необходимо его температуру поднять до температуры воспламенения (табл. 8).

Например, полное горение углерода и водорода может быть представлено реакциями:



При неполном сгорании углерода получаем реакцию

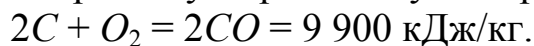


Таблица 8. Температура воспламенения сухого топлива

Топливо	$t_{\text{ВОС}} \text{ } ^\circ\text{C}$	Топливо	$t_{\text{ВОС}} \text{ } ^\circ\text{C}$
Каменный уголь	500...650	Природный газ	800
Бурый уголь	620...700	Водород	800...850
Дрова	620...700	Метан	1080
Торф	500...650	Этан	860
Кокс, антрацит	920...970	Окись углерода	890
Керосин	650	Ацетилен	600...770
Бензин	690	Генераторный газ	800

При неполном сгорании на выходе из топки получаем угарный газ, который представляет опасность для жизни людей и животных. Для полного сгорания топлива теоретически объем необходимого воздуха определяется по формуле  $C + O_2 = CO_2$ . Формула показывает, что на каждые 12 кг углерода расходуется  $2 \cdot 16 = 32$  кг кислорода (12 и 16 — атомные веса из таблицы элементов Менделеева). На 1 кг углерода расходуется 2,67 кг кислорода. Но в топочную камеру котельного агрегата подается не кислород, а воздух, в котором содержится 23% кислорода по массе, а плотность воздуха при нормальных условиях  $1,293 \text{ кг/м}^3$ . Тогда теоретический объем воздуха для полного сгорания 1 кг углерода равен

$$V_{\text{ВОЗ.ТЕОР}} = \frac{2,67}{0,23 \cdot 1,293} = 8,97 \text{ м}^3.$$

На практике при таком значении не удастся достигнуть полного сгорания топлива, поэтому учитывают необходимые коэффициенты избытка воздуха  $\alpha_{\text{ИЗБ}}$ .

$$V_{\text{ВОЗ.ТРЕБ}} = \alpha_{\text{ИЗБ}} V_{\text{ВОЗ.ТЕОР}}.$$

Для пылевидного и газообразного топлива  $\alpha_{\text{ИЗБ}} = 1,03 \dots 1,16$ , для твердого топлива  $\alpha_{\text{ИЗБ}} = 1,3 \dots 1,65$ .

Сравним работу котельной с электрокотлами мощностью 50 кВт с котельной, работающей на отходах производства изделий из дерева. Пусть электрокотельная работает в течение суток 12 часов. Тогда она потребляет в течение суток количество электроэнергии

$$W_{\text{ЭЛ}} = P_{\text{КОТ}} t_{\text{РАБ}}, \quad W_{\text{ЭЛ}} = 50 \cdot 12 = 600 \text{ кВт}\cdot\text{часов}.$$

Это соответствует полученной теплоте соответствии с таблицей 1 ( $1 \text{ кВт}\cdot\text{час} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 3,6 \cdot 10^3 \text{ кДж}$ ):

$$Q_{\text{ЭЛ}} = A_{\text{ЭЛ}} 3,6 \cdot 10^3 = 600 \cdot 3,6 \cdot 10^3 = 2160 \cdot 10^3 \text{ кДж}.$$

От сжигания 1 кг дров получим количество тепла:

$$Q_{\text{др}} = 29\,300 \text{ кДж/кг} \cdot \mathcal{E}_T = 29\,300 \cdot 0,26 = 7618 \text{ кДж.}$$

Для получения  $2\,160 \cdot 10^3$  кДж тепла (как от электрочувствительной) необходимо сжечь дров

$$V_{\text{др}} = Q_{\text{эл}}/Q_{\text{др}} = 2\,160 \cdot 10^3 / 7\,618 = 283,5 \text{ кг.}$$

Если  $1 \text{ м}^3$  дров имеет массу примерно 750 кг, то для получения 600 кВт·часов тепловой энергии придется сжечь  $0,378 \text{ м}^3$  дров. Такие сведения необходимо представлять при проведении экономических расчетов.

### 5.3. Обмен тепловой энергией между телами

Теплота  $Q$  и работа  $A$  в соответствии с законом сохранения и превращения энергии могут взаимно преобразовываться при соотношении

$$Q = A \quad \text{и} \quad A = Q.$$

Энергия не исчезает и не возникает вновь, поэтому из данного количества теплоты при полном ее превращении в работу получается строго определенное количество работы.

Всюду, где есть разность температур двух тел, происходит теплообмен. Теплообмен — это самопроизвольный необратимый процесс распространения теплоты в жидких, твердых и газообразных средах. Существует три способа переноса теплоты: теплопроводность, конвективный теплообмен и теплообмен излучением. Во всех случаях тепло передается от более нагретого тела к менее нагретому. При этом внутренняя энергия менее нагретого тела увеличивается (положительная) и температура его увеличивается до тех пор, пока температуры тел не сравняются — наступает тепловое равновесие. Всякое изменение параметров состояния рабочего тела называется *термодинамическим процессом*. Под параметрами следует понимать температуру и давление.

Способ передачи тепловой энергии в твердых или от жидких к твердым телам, или от твердых к жидким телам называется *теплопроводностью*. В хороших проводниках энергия передается быстро за счет движения свободных электронов, а в плохих проводниках (изоляторах) за счет колебаний атомов и их соударений с ближайшими соседями. Изоляторами при передаче тепловой энергии являются древесина и большинство жидкостей, у них нет свободных электронов. Насколько хорошим проводником тепла является материал, показывает коэффициент теплопроводности. Так, у алюминия коэффициент теплопроводности  $K_{\text{Ал}} = 207 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , а у воды  $K_{\text{В}} = 0,6 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Материалы, коэффициент теплопроводности ко-

торых менее 0,25 Вт/(м·К) называются теплоизоляционными. При температуре 20 °С и давлении 0,1 МПа коэффициент теплопроводности воздуха  $K_{\text{воз}} = 0,026$  Вт/(м·К). Скорость переноса тепловой энергии через единицу площади сечения тела зависит от коэффициента теплопроводности материала и градиента температуры — изменения температуры с расстоянием вдоль материала. Чем выше удельная теплопроводность и чем выше градиент, тем быстрее происходит теплоперенос.

$$V_{\text{ПЕР}} = K_T \frac{t_1 - t_2}{X},$$

где  $V_{\text{ПЕР}}$  — скорость передачи тепловой энергии через единицу площади;

$K_T$  — коэффициент теплопроводности материала;

$t_1 - t_2$  — разность температур между точками;

$X$  — расстояние между точками;

$\frac{t_1 - t_2}{X}$  — градиент температуры.

Перенос тепла потоком называется *конвекцией*, которая наблюдается в жидкостях и газах. При нагревании жидкость или газ расширяются, плотность их уменьшается, и их потоки поднимаются вверх. Более холодные и более плотные слои опускаются. Возникают конвективные потоки. Конвективные потоки воздуха поднимают планер. Конвективные потоки масла в баке трансформатора охлаждают обмотки и магнитопровод.

*Лучистый (радиационный)* перенос тепла — это перенос тепла электромагнитными волнами, а именно инфракрасными волнами. Падая на тело, инфракрасные лучи частично поглощаются, увеличивая его внутреннюю энергию, а значит, и температуру. Инфракрасные волны излучаются нагретыми телами, длина волны такого излучения больше длины волн видимого света, но короче длины радиоволн. Вблизи батареи отопления мы ощущаем инфракрасное излучение, а прикасаясь к батарее, нагрев происходит за счет теплопроводности.

## 5.4. Тепловое расширение

Большинство веществ при нагревании расширяется – их молекулы движутся быстрее и расстояние между ними увеличивается. Степень этого расширения называется коэффициентом объемного расширения и зависит от межмолекулярных сил. При постоянном давлении (при одном и том же количестве подведенного тепла) твердые тела расширяются меньше — их молекулы ближе друг к другу и силы взаимодействия между ними больше. Жидкости расширяются сильнее, а больше всего расширяются газы.

Коэффициент объемного расширения — это относительное изменение объема при изменении температуры на 1К. Так как газы расширяются очень сильно, то за исходный берут объем при температуре 0 °С, чтобы можно было сравнивать результаты измерений. Аномальное расширение имеет вода, она расширяется при охлаждении от 4 до 0 °С, поэтому образовавшийся лед при замерзании воды разрывает сосуды.

Относительное удлинение твердого тела при изменении температуры на 1 К называется коэффициентом линейного расширения. На этом принципе работают защитные устройства электрических сетей и потребителей: тепловые расцепители автоматических выключателей и тепловые реле. В этих устройствах органом, реагирующим на увеличение тока при перегрузках сети, является биметаллическая пластинка. Если жестко соединить две пластинки с разным коэффициентом линейного расширения, например, цинк и железо, то при нагревании пластинки начнут изгибаться. Она может воздействовать на контакты и разрывать электрическую цепь. На этом принципе кроме защитных устройств работают термодатчики.

Линейное расширение следует учитывать при прокладке тепловых сетей. Через определенные прямолинейные участки устанавливаются тепловые компенсаторы в виде П-образных горизонтальных или вертикальных выступов. Иногда устанавливают гофрированные компенсаторы. Трубы на всем протяжении изолируют стекловатой или теплоизоляционными цилиндрами, которые сверху покрывают для защиты от механических повреждений металлическими листами.

## 5.5. Простейшие отопительные устройства

Самым простым источником теплоты в жилых и производственных помещениях являются отопительные печи. В печах отопления в процессе горения топлива нагреваются кирпичи, из которых конструируется печь, а затем тепловая энергия от кирпичей передается окружающему воздуху, создавая необходимые условия для жизни живых организмов.

В небольших поселках или многоквартирных домах теплоснабжение потребителей осуществляется от местной котельной. В такой котельной при сгорании топлива нагревается бак с теплоносителем, обычно обессоленной водой. От бака за счет естественной циркуляции или при помощи небольших насосов по трубам вода подается к теплоприемникам потребителей. Уровень теплоносителя в баке поддерживается из небольшого расширителя. На газе такая котельная работает в автоматическом режиме.

## 5.6. Системы теплоснабжения

Системы теплоснабжения предназначены для обеспечения потребителей необходимым количеством теплоты. Они состоят из источника теплоты — котельной, тепловых сетей — изолированных трубопроводов и потребителей тепла. В котельных химическая энергия топлива (газа, каменного угля) превращается в тепловую, сообщаемую предварительно химически очищенной воде. Котельные небольшой мощности в качестве топлива могут расходовать электроэнергию, в таких электрокотельных электрическая энергия превращается в тепловую. В связи с увеличением стоимости газа и угля котельные в сельских районах переводят на местные виды топлива: торф, отходы деревообработки. Нагретая вода центробежными насосами передается по трубопроводам потребителям.

Для централизованного теплоснабжения населенных пунктов, промышленных предприятий, районов устанавливаются водогрейные котлы. Они предназначены для целей отопления и для получения горячей воды. Водогрейные котлы работают по прямоточной схеме с постоянным расходом воды. Конечная температура нагрева воды определяется условиями поддержания стабильной температуры в жилых и рабочих помещениях. Вода, нагретая в водогрейном котле, циркулирует в отопительных приборах, обогревающих помещения. Поэтому при постоянной поверхности отопительных приборов, температуру воды, подаваемой в них, повышают при снижении температуры наружного воздуха. Обычно воду тепловой сети в котлах подогревают от 70-104 до 150-170 °С.



Во избежание конденсации водяных паров из уходящих из котла газов и связанной с этим наружной коррозии поверхностей нагрева температура воды на входе котла должна быть выше точки росы для продуктов сгорания. При работе на природном газе температура воды на входе в котел не должна быть ниже 60 °С. Поскольку в тепловой сети температура воды может охлаждаться до температуры ниже 60 °С, тогда перед входом в котел к ней подмешивается некоторое количество уже нагретой в котле (прямой) воды.

Температуру и давление называют параметрами теплоносителя. Вместо давления на практике используют понятие «напор». Напор и давление связаны соотношением:

$$H = P/\rho g,$$

где  $\rho$  — плотность теплоносителя, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Вода как теплоноситель имеет различные температуры до и после нагревательного прибора. Мощность теплового потока  $Q$ , отдаваемого водой, определяется по формуле

$$Q = G c (t_1 - t_2),$$

где  $G$  — количество воды (масса), проходящей через нагреватель, кг/с;

$c$  — теплоемкость воды, это количество теплоты, которое надо сообщить одному кг воды, чтобы увеличить ее температуру на 1 °С,  $c = 4,19$  кДж/(кг·°С);

$t_1$  — температура воды на входе нагревателя;

$t_2$  — температура воды на выходе нагревателя, °С.

Чаще всего в системах централизованного теплоснабжения

$$t_1 = 105 (95) \text{ °С} \quad \text{и} \quad t_2 = 70 \text{ °С}.$$

Температура воды в системах теплоснабжения должна соответствовать давлению, при котором не будет её вскипания. Так вода при температуре  $t_1 = 150$  °С, которая поддерживается в зимнее время в водогрейных котлах ТЭЦ, должна иметь давление не ниже 0,4 МПа. Повышение температуры у источника теплоты ведет к снижению объема перекачиваемой жидкости, снижению расходов на электроэнергию. Это следует из преобразования предыдущей формулы

$$G = \frac{Q}{c (t_1 - t_2)}.$$

Учитывая, что расход (объем)  $V$  и масса воды  $G$  связаны соотношением

$$V = G/\rho,$$

где  $\rho$  — плотность воды, кг/м<sup>3</sup>, получим соотношение

$$V = \frac{Q}{c(t_1 - t_2)}\rho.$$

Из последней формулы следует, что для передачи того же количества теплоты  $Q$  тем меньше потребуется объем воды  $V$ , чем больше разность температур  $t_1 - t_2$ .

### 5.7. Отопительные котельные

В отопительных котельных сжигается топливо и нагревает воду. В мощных котельных для полного сжигания твердое топливо предварительно размалывают и вдувают в топку котла. Топливо сгорает в форме факела и отдает свою энергию через теплопроводность и излучение воде, которая движется снизу вверх по экранным трубам. Этими экранными трубами выложена вся внутренняя поверхность котла. Твердые частицы отработавшего топлива вывозятся в золоотвал, а дымовые газы с мелкими частицами выбрасываются в окружающую среду через дымовую трубу. Высота трубы, с одной стороны, обеспечивает тягу в котле, а с другой стороны — рассеивает дымовые газы на обширную окружающую территорию.

Нагретая в котельном агрегате вода по подающему трубопроводу тепловой сети П поступает к теплообменным аппаратам, а охлажденная вода по обратному О трубопроводу сетевым насосом СН закачивается в котел (рис. 5.2). Отсюда видно, что сетевая вода циркулирует по замкнутому контуру. В теплообменных аппаратах тепловая энергия воды путем теплопередачи и теплового (инфракрасного) излучения нагревает воздух. Нагретый воздух путем конвекции перемещается и нагревает все помещение.

Перед котельным агрегатом обратная вода проходит грязевик  $Гр$ , где очищается от механических примесей (окалины, песок, коррозионные отложения). Особенно много механических примесей после проведения ремонтных работ на тепловых сетях.

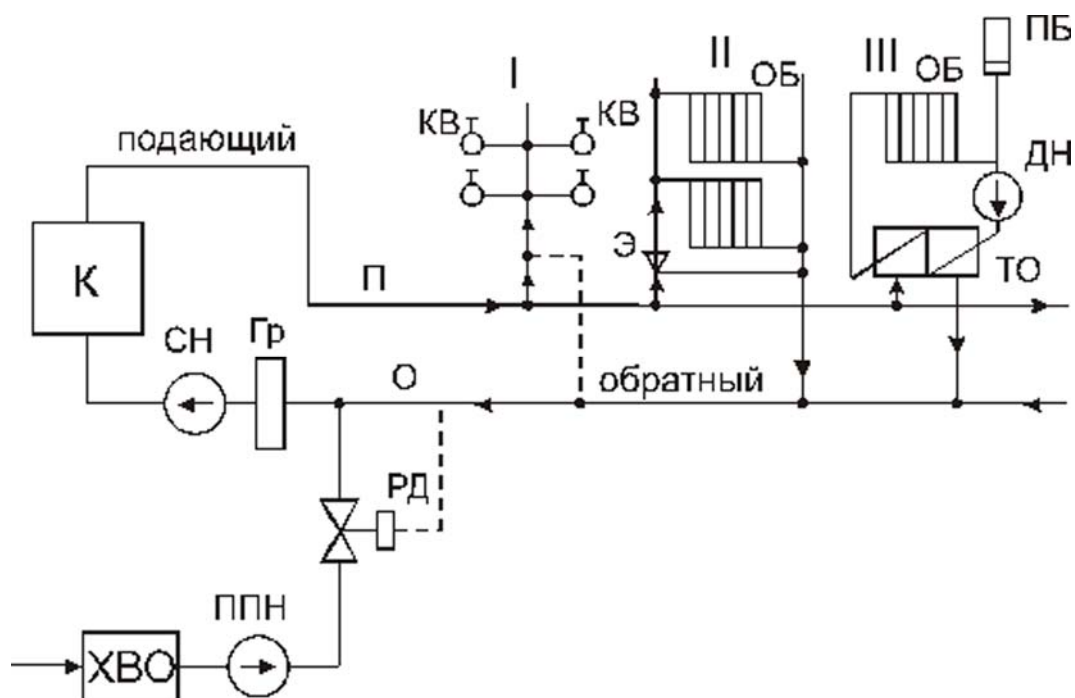


Рис. 5.2. Тепловая сеть отопительной котельной:  
*К* — котел; *СН* — сетевой насос; *П* — подающий трубопровод;  
*О* — обратный трубопровод; *ХВО* — химводоочистка;  
*ППН* — подпиточный насос; *РД* — регулятор давления;  
*Гр* — грязевик; *Э* — элеватор; *КВ* — кран водоразборный;  
*ОБ* — отопительные батареи; *ТО* — теплообменник;  
*ДН* — добавочный насос; *ПБ* — подпиточный бачок

В водяных тепловых сетях всегда существуют утечки теплоносителя через неплотности в системе. Эти утечки восполняются химически очищенной водой, освобожденной от газов. Для этой цели подпиточная вода проходит химводоочистку (ХВО) и через регулировочный клапан РД подпиточным насосом добавляется в обратную воду. Подпитка осуществляется автоматически. В ХВО вода умягчается, что устраняет образование накипи, удаление из воды кислорода, углекислоты и нерастворимых примесей, предотвращает образование коррозии и загрязнение элементов теплоснабжения. Из прямого или обратного трубопроводов горячая вода может отбираться через водоразборные краны КВ.

Для индивидуального отопления горячая вода проходит через теплообменник ТО и дополнительным насосом подается в батареи отопления. В индивидуальных отопительных системах подпитка воды осуществляется от подпиточного бачка ПБ, за уровнем воды в котором необходимо все время следить.



Вода из подающих трубопроводов тепловой сети частично проходит через регулятор РО непосредственно к элеваторам Э абонентов, а в остальной части проходит через подогреватель ПВ, где охлаждается за счет нагрева водопроводной воды и далее смешивается с водой, прошедшей через РО.

Часть воды, отдавшая теплоту в отопительных приборах О, возвращается в обратный трубопровод сети, а другая часть подхватывается насосом НО и вновь возвращается в отопительные приборы в смеси с водой, поступившей из подающей магистрали теплосети через РО и ПВ.

Водопроводная вода нагревается сначала в ПН за счет энергии обратной воды, а затем в ПВ водой из подающей магистрали и направляется к водоразборным кранам К. Не использованная в кранах вода циркулирует в этом контуре, для чего подается в линию водопроводной воды между ПН и ПВ.

ЦТП обслуживает группу зданий, поэтому позволяет обходиться без индивидуальных регуляторов. При этом в качестве импульса для регулирования отопления могут служить либо температура воздуха в помещении, либо температура воздуха в устройстве, моделирующем температурный режим отапливаемых помещений. В практике использования ЦТП нашли применение водо-водяные секционные водоподогреватели, одна из секций которого показана на рисунке 5.4. Обычно для нагрева воды используется несколько последовательно соединенных секций.

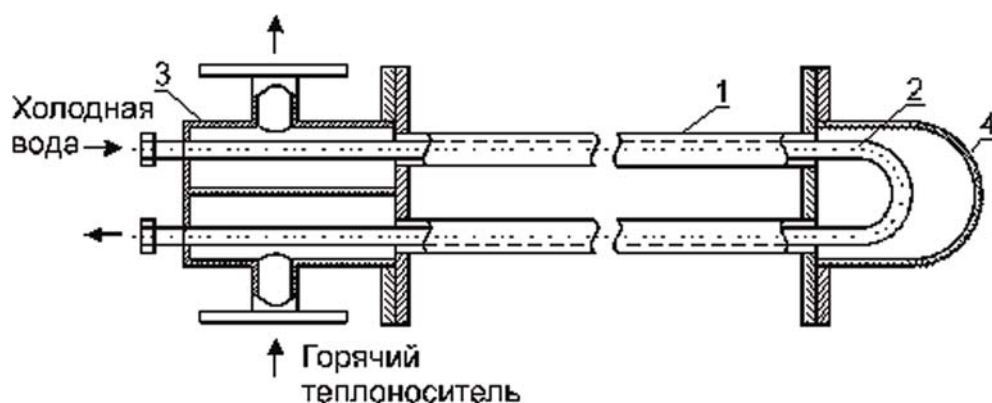
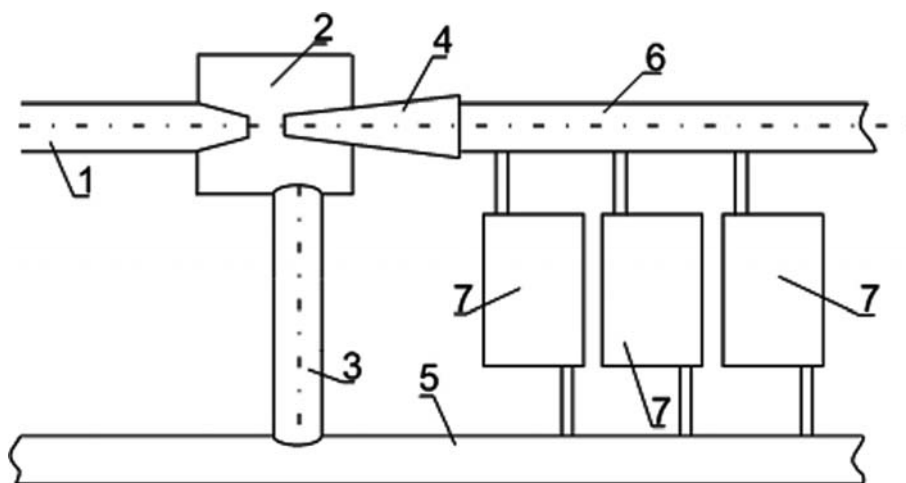


Рис. 5.4. Секция проточного водонагревателя:

1 — наружная (кожуховая) труба; 2 — внутренняя (теплообменная) труба; 3 — распределительная камера; 4 — поворотная камера

В теплообменных аппаратах используют обычно принцип противотока горячей воды и нагреваемой. Это применено и на рисунке 5.5, горячая вода протекает по наружной трубе и за счет теплопроводности передает свою энергию внутренней трубе, по которой циркулирует нагреваемая вода. Для увеличения площади теплопередачи в качестве внутренней трубы используют несколько параллельно включаемых латунных трубок.



*Рис. 5.5. Принцип действия элеватора:  
 1 — вода от котельной; 2 — смешивательная камера;  
 3 — соединительная труба; 4 — эжектор;  
 5 — обратный трубопровод; 6 — прямой трубопровод  
 к отопительным приборам; 7 — отопительные приборы*

Во многих случаях приходится смешивать отработавшую в нагревателях воду с поступающей горячей водой. Такое смешивание осуществляется в элеваторах. Элеватор абонентов — этот струйный насос представляет собой сопло 1, на выходе которого увеличивается скорость движения воды, а значит, и снижается давление. В зону пониженного давления 2 подается по соединительной трубе 3 часть воды, прошедшей через нагревательные приборы 7. На выходе элеватора 4 движется смесь прямой воды и обратной по прямому трубопроводу 6. Чем больше обратной воды подмешивается в прямую воду, тем температура воды в отопительных приборах меньше.

Таким образом регулируется температура в нагревательных приборах помещений.

## 6. ВОДОСНАБЖЕНИЕ СЕЛЬСКИХ НАСЕЛЁННЫХ ПУНКТОВ

Естественный природный источник — вода наравне с огнем, воздухом и землей является первоисточником жизни. Общее количество пресной воды на земле составляет примерно 24 млн. куб. км (2% от массы вод морей и океанов). Большинство пресной воды 23 млн. куб. км сосредоточено в ледяных массивах Антарктиды и Гренландии. Человек и животные для своей жизни потребляют пресную воду. Вода входит в состав тканей, без нее невозможно осуществить процессы обмена веществ и удаление продуктов жизнедеятельности живых организмов. Даже в холодных зонах Земли для сохранения нормальной работоспособности человеку необходимо от 1,5 до 2,5 литров в сутки. Удельное среднесуточное водопотребление в жилых домах с водопроводом, канализацией, газоснабжением составляет 160-200 л/сут. на человека.

Водные ресурсы России для среднего по водности года оцениваются примерно в 4...4,5 тыс. км<sup>3</sup>/год, из них около 80% составляют поверхностные воды и около 20% — подземные [11].

Для сельскохозяйственного водоснабжения используют практически все природные источники воды и искусственные водоёмы — подземные воды, реки, озёра, водохранилища, каналы, цистерны для сбора атмосферных осадков.

На одну голову крупного рогатого скота при молочной продуктивности 4000 кг расход воды составляет на поение 48 л/сут., на двухразовое доение и прочие расходы — 29 л/сут. На одну голову свиней в фермерских и крестьянских хозяйствах на поение, приготовление кормов, мытье посуды в среднем расходуется 10,5 л/сут. На обслуживание одной грузовой автомашины предусматривается 0,16 л на 1 л. с. мощности двигателя.

Средневзвешенные поливные нормы сельскохозяйственных культур на приусадебных участках при поливе ручным методом в Костромской области в июле составляют 226-250 м<sup>3</sup>/га.

Под *водоснабжением* понимают обеспечение водой населённых пунктов, предприятий и других объектов для удовлетворения хозяйственно-питьевых, технологических и противопожарных нужд.

*Системой водоснабжения* является комплекс сооружений, машин и аппаратов, предназначенных для добычи, улучшения качества и подачи воды потребителям.

*Водопроводом* называется централизованная система водоснабжения, подача и распределение воды в которой производится по трубам.

Системы водоснабжения классифицируют по следующим признакам [12]:

- по *назначению*: коммунальные, производственные, сельскохозяйственные, железнодорожные, противопожарные;
- *территориальному признаку*: локальные и районные;
- *способу подачи воды*: водопроводы самотечные (гравитационные) и с механической подачей воды (с помощью насосов);
- *виду использования природных источников*: наземные (из рек), подземные (подземные реки и водоносные слои), смешанного питания.

Непосредственно устройство систем водоснабжения можно разделить на три типа: децентрализованные, централизованные и смешанные.

*Децентрализованная, или локальная система* снабжает водой отдельные здания или небольшую их группу отдельно вне зависимости от других объектов. На каждом объекте предусматривается свой водопровод.

*Централизованная система* снабжает водой все объекты по единому водопроводу. При этом водопроводные сооружения, предназначенные для забора, очистки и транспортирования воды, рассчитываются на подачу воды всем потребителям, находящимся на территории действия системы.

*Комбинированная система* снабжает водой отдельные группы водопотребителей централизованно, с помощью групповых водопроводов, другие объекты могут иметь локальное водоснабжение.

В общем случае водоснабжение включает в себя следующие операции:

- 1) водозабор;
- 2) очистка и улучшение воды;
- 3) накопление воды и создание необходимого напора;
- 4) передача воды потребителю.

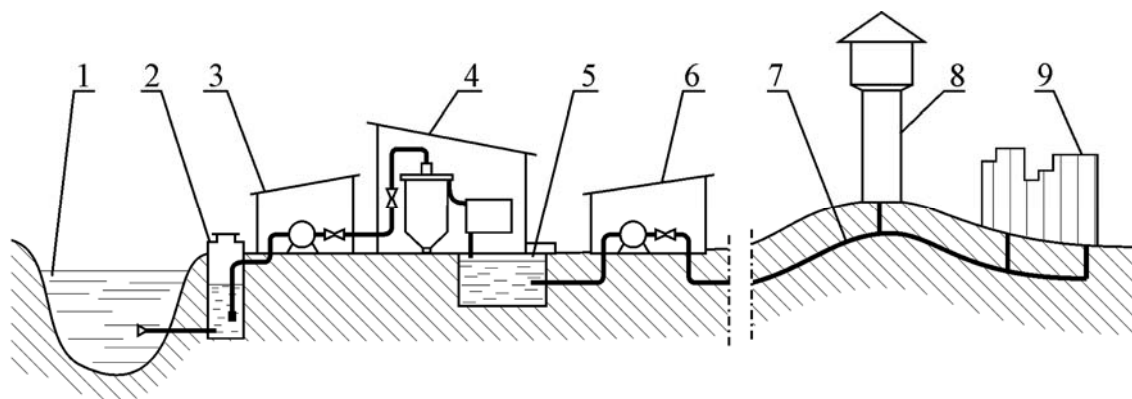
В централизованной системе водоснабжения водозабор производится на насосных станциях. Эти станции подразделяют на насосные станции I и II подъёма.



Насосные станции I подъёма забирают воду из источника водоснабжения и подают её на очистные сооружения или, если не требуется очистка воды, то в водонапорную башню и к потребителям.

Для водоснабжения крупных сельскохозяйственных объектов используют двухступенчатую систему водоподъема. Насосные станции I подъёма закачивают воду в промежуточные баки-накопители, откуда насосами II подъёма вода подается в водонапорную башню и к потребителям. Регулирование уровня воды осуществляется как в баках-накопителях, так и в водонапорной башне [13].

Сельскохозяйственное водоснабжение может осуществляться по нескольким схемам. Схема водоснабжения прежде всего зависит от вида источника [11]. На рисунке 6.1 показана наиболее полная схема водоснабжения с поверхностным источником 1, вода из которого поступает в береговой колодец 2, откуда насосной станцией I подъёма 3 перекачивается на очистную водопроводную станцию 4. Пройдя очистку, вода собирается в резервуаре чистой воды 5, откуда насосной станцией II подъёма 6 по водоводу 7 поступает водопотребителю 9. В систему водоснабжения включена водонапорная башня 8.



*Рис. 6.1. Схема водоснабжения с поверхностным источником:  
1 — источник воды; 2 — береговой колодец;  
3 — насосная станция I подъёма; 4 — очистная водопроводная станция;  
5 — резервуар чистой воды; 6 — насосная станция II подъёма;  
7 — водовод; 8 — водонапорная башня; 9 — водопотребители*

Схема водоснабжения из подземного источника показана на рисунке 6.2. Вода из колодца 1 насосной станцией I подъёма 2 перекачивается в резервуар чистой воды 3. Насосная станция II подъёма 4 подаёт воду по водоводу 5 потребителю 6 и в водонапорную башню 7.

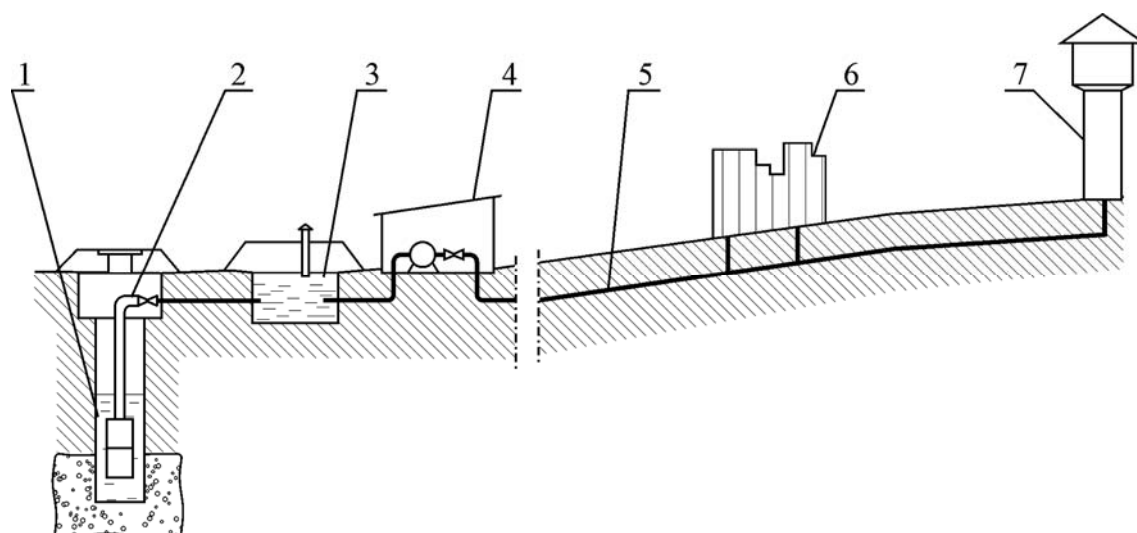


Рис. 6.2. Схема водоснабжения с подземным источником:

1 — колодец; 2 — насосная станция I подъёма;

3 — резервуар чистой воды; 4 — насосная станция II подъёма;

5 — водовод; 6 — водопотребители; 7 — водонапорная башня

В насосных станциях I подъёма используют различные насосы для подъёма воды с глубины до 100 м. Наибольшее распространение получили многоступенчатые электроприводные центробежные водонасосы (ЭЦВ), которые через жесткую муфту соединены с погружными электродвигателями водозаполненными (ПЭДВ). Вода, засасываемая ЭЦВ, одновременно охлаждает ПЭДВ. В насосных станциях II используют обычные центробежные насосы с электроприводом.

### 6.1. Водозаборные сооружения

Воду из различного вида источников забирают водозаборными сооружениями (водозаборами).

*Водозабором* называют комплекс гидротехнических сооружений, служащих для забора воды из водоисточника, её предварительной очистки и подачи под необходимым напором и в необходимом количестве потребителю или на очистные сооружения.

Для забора поверхностных вод применяют кривы, береговые, русловые, приплотинные и другие типы водозаборных сооружений. Для забора подземных вод используют трубчатые и шахтные колодцы, горизонтальные водозаборы, лучевые водозаборы, каптажи родников.

Свыше 90% систем сельскохозяйственного водоснабжения базируется на подземных водах из-за их повсеместной распространённости и высокого качества [11].

Подземные воды могут быть безнапорными и напорными.

Безнапорные подземные воды заполняют водоносные слои не полностью и имеют свободную поверхность, давление над которой равно атмосферному.

Напорные подземные воды — артезианские, располагаются между водоупорными пластами и заполняют водоносные слои полностью (рис. 6.3). Артезианские воды, как правило, характеризуется высоким качеством и могут использоваться в хозяйственно-питьевых нуждах без очистки.

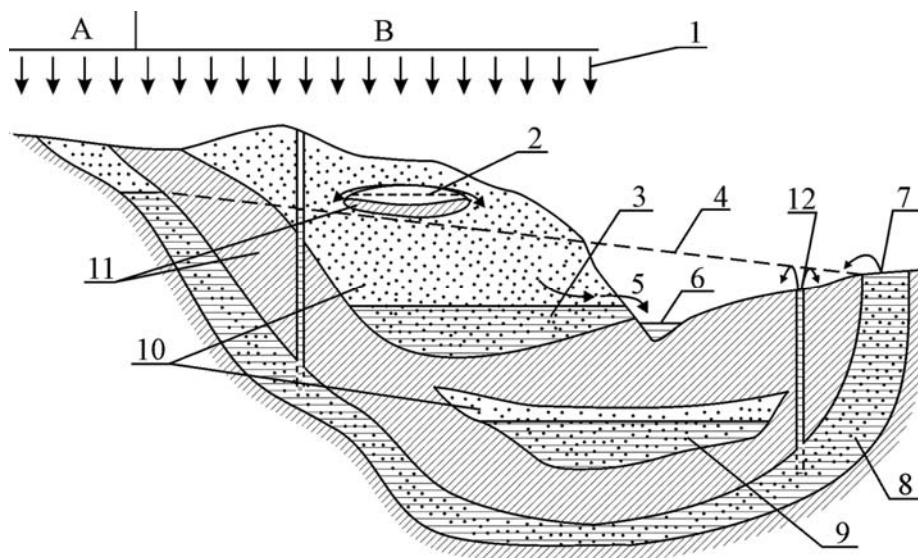


Рис. 6.3. Схема залегания подземных вод:

А — область питания межпластовых вод;

- В — область питания грунтовых вод; 1 — осадки; 2 — верховодка;  
 3 — грунтовые воды; 4 — пьезометрическая линия; 5 — нисходящий родник;  
 6 — река; 7 — восходящий родник; 8 — межпластовые напорные воды;  
 9 — межпластовые безнапорные воды; 10 — водопроницаемые грунты;  
 11 — водоупоры; 12 — артезианская скважина

Для забора подземных вод применяют три основных вида сооружений:

- вертикальные водозаборы;
- горизонтальные водозаборы;
- каптажи.

К *вертикальным водозаборам* относятся водозаборные буровые скважины и шахтные колодцы. Водозаборные буровые скважины сельскохозяйственного назначения имеют диаметр 150...400 мм и глубину до 500 м. Они применяются в основном для добывания межпластовых вод, залегающих на большой глубине. Шахтные колодцы применяют в основном для добывания грунтовых вод, залегающих на глубине до 30 м. Диаметры шахтных колодцев 1 м и более.

*Горизонтальные водозаборы* — дренажные трубы или галереи, заложенные горизонтально в водоносном пласте с небольшим уклоном и отводящие подземную воду самотёком в приёмные (сборные) камеры. Применяют их преимущественно для добывания неглубоко залегающих (до 6...7 м) грунтовых вод при малой (1...3 м) мощности водоносных пластов.

*Каптажи* — представляют собой сооружения для захвата ключевой (родниковой) воды.

Подъём воды из источников, в системах сельскохозяйственного водоснабжения, в основном, производится посредством радиальных и погружных скважинных насосов.

Радиальные насосы характеризуются компактностью, высоким КПД, надёжностью, относительной конструктивной простотой и удобством эксплуатации.

Основной рабочий орган радиального насоса — рабочее колесо с лопатками, расположенное внутри корпуса на валу (рис. 6.4).

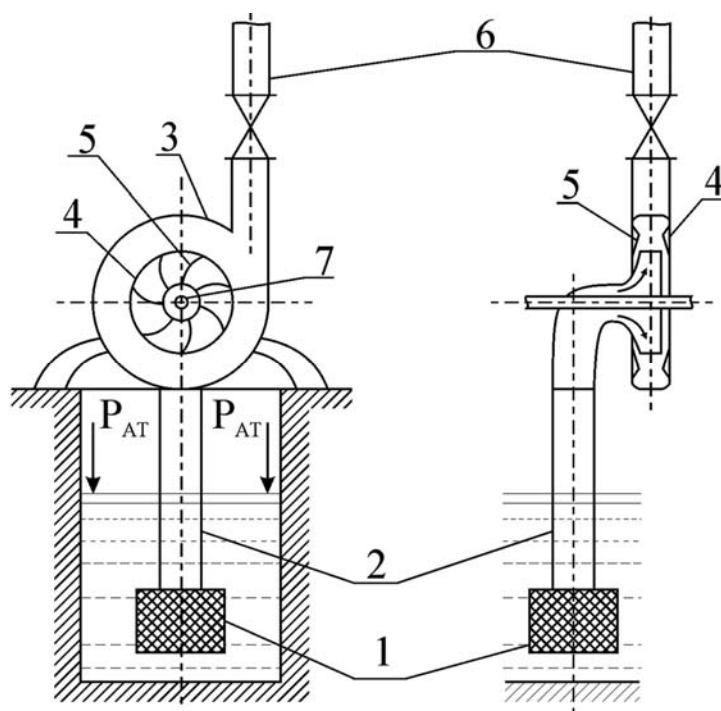


Рис. 6.4. Радиальный насос:

- 1 — всасывающий клапан с сеткой; 2 — всасывающий трубопровод; 3 — корпус; 4 — рабочее колесо; 5 — лопатки; 6 — напорный трубопровод; 7 — вал

Лопатки 5 рабочего колеса 4 изогнуты в сторону, противоположную направлению вращения колеса. Корпус насоса 3 соединён со всасывающим 2 и напорным 6 трубопроводами. Перед пуском

насоса его корпус 3 и всасывающий трубопровод 2 заполняют жидкостью. При вращении рабочего колеса 4 жидкость, находящаяся в корпусе между лопатками, под действием центробежной силы отжимается к периферии, переходит в спиральную камеру и затем в напорный трубопровод 6. В центре насоса, перед входом в рабочее колесо, возникает пониженное давление, и жидкость под действием атмосферного давления через всасывающий клапан 1 поступает из всасывающего трубопровода 2 в насос.

Радиальные насосы имеют широкий диапазон напора и подачи, и не требуют сложного ухода при эксплуатации.

Следующим наиболее используемым типом являются погружные скважинные насосы. Основными их преимуществами являются: отсутствие длинного трансмиссионного вала и промежуточных подшипников; возможность их установки в искривленных скважинах; простота монтажа и демонтажа насосной установки; возможность установки насоса непосредственно в колодце. К недостаткам большинства конструкций погружных насосных агрегатов относятся высокие требования к качеству воды, подаваемой из скважин. Особенно чувствительны такие агрегаты к механическим примесям, содержание которых не должно превышать 100 мг/л [14].

Погружные скважинные насосы в основном предназначены для подачи воды из артезианских скважин. Погружной насос погружается непосредственно в шахту водозабора (см. рис. 6.2).

С применением погружных скважинных насосов отпадает необходимость в сложных очистных сооружениях, потому что вода поступает к потребителю из подземных источников. Только в сельском хозяйстве общее число скважин для воды превышает 350 тыс., а ежегодно по стране бурят до 30 тыс. скважин глубиной до 150 м [3].

## 6.2. Улучшение качества воды

Улучшение качества воды производится на очистных сооружениях. Качество воды характеризуется её физическими, химическими и бактериологическими свойствами [11].

*Основные физические свойства:*

- *мутность* — зависит от содержания в воде взвешенных веществ. Стандарт на питьевую воду допускает мутность до 1,5 мг/л;
- *прозрачность* — способность воды пропускать лучи света;

- *цветность* — обусловлена наличием в воде гуминовых веществ (природные органические соединения, составляющие от 50 до 90 % органического вещества торфа, углей, сапропелей и неживой материи почвенных и водных экосистем). Цветность выражается в градусах платиновокобальтовой шкалы, разделённой на 500°. Стандарт допускает 35°;
- *вкус и запах* — зависят от растворённых в воде газов, минеральных солей и органических примесей. Слабый вкус и запах, не поддающийся обнаружению, оценивается в 1 балл. При появлении вкуса и запаха число баллов увеличивается. Стандарт допускает 2 балла;
- *температура воды* — для питья и хозяйственных нужд должна находиться в пределах 8...12 °С.

*Основные химические свойства:*

- *сухой остаток* — характеризует общее содержание растворённых в воде химических веществ. Стандарт допускает 1 000 мг/л;
- *жёсткость воды* — обусловлена наличием в воде растворённых солей кальция и магния, должен быть не более 7 мг·экв/л.
- *активная реакция воды* — характеризуется концентрацией в ней водородных ионов и обозначается рН: при рН < 7 среда кислая, рН = 7 — нейтральная, рН > 7 — щелочная. Стандарт допускает уровень рН = 6,5...7,5.
- *фтор* — избыток его вызывает заболевание и разрушение зубов, а недостаток кариес. Стандарт допускает 0,7...1,5 мг/л.
- *йод* — малое содержание может вызвать заболевание щитовидной железы. Стандарт допускает 0,0001 мг/л.
- *соединения азота* — аммиак, соли азотистой и азотной кислоты чаще всего образующиеся при разложении белковых и других органических веществ. Стандарт допускает 10 мг/л.

*Бактериологическая заражённость воды* характеризуется общим числом бактерий, содержащихся в 1 мл воды, а также содержанием в 1 л воды кишечных палочек (коли-бактерий). Большинство бактерий, встречающихся в природной воде, безвредны для человека. Однако в ней могут находиться и болезнетворные (патогенные) бактерии, вызывающие инфекционные заболевания, такие как холера, дизентерия, туляремия, брюшной тиф и др. Патогенные бактерии появляются в воде главным об-

разом при попадании в неё экскрементов человека и животных. При бактериологических анализах определяют содержание в воде кишечных палочек, постоянно живущих в кишечнике человека и животных. Кишечная палочка сама по себе не является болезнетворной бактерией, но обнаружение её в воде свидетельствует о загрязнении её фекальными водами, а следовательно, и о возможности попадания болезнетворных бактерий.

При анализах воды определяют:

- общее число бактерий в 1 мл воды;
- число кишечных палочек в 1 л воды — этот показатель называется *коли-индекс*;
- объем воды в мл, в котором содержится одна кишечная палочка, — этот показатель называется *коли-титр*.

Стандарт по бактериологической загрязненности воды допускает общее количество бактерий в 1 мл — 100, коли-индекс — 3, коли-титр — 300.

Если качество воды не соответствует вышеуказанным стандартам, то она подвергается очистке.

### 6.3. Основные методы очистки воды

Очистка воды заключается в её осветлении, обесцвечивании, дезодорации и обеззараживании.

Осветление воды производится посредством отстаивания и фильтрования. Отстаивание воды производится в специальных бассейнах-отстойниках, фильтрование — на фильтрах.

Для интенсификации процесса осветления применяют коагулирование взвесей, добавляя в воду химические вещества — коагулянты. Коагулянты, распадаясь на катионы и анионы, нейтрализуют отрицательно заряженные частички взвесей, что позволяет им слипнуться в более крупные и быстрее выпасть в осадок. В то же время коагулянты, вступая в реакцию с растворёнными в воде солями, образуют хлопья, которые собирают частицы взвесей и увлекают их в осадок.

Самым распространённым коагулянтом в России является сернокислый алюминий  $Al_2(SO_4)_3$  — глинозём.

*Хлорирование* является наиболее распространённым методом обеззараживания воды. Известно, что хлор — это яд. Яд настолько сильный, что именно хлор был одним из первых газов, использовавшихся в Первой мировой войне в качестве химического оружия. Токсичность хлора связана с его высокой окислительной способно-

стью — он входит в тройку самых сильных галогенов. Это, в свою очередь, означает, что хлор способен разрушать любую органику и создавать на её основе хлорорганические соединения.

Для хлорирования воды на водопроводных очистных станциях используется жидкий хлор и хлорная известь. После процесса хлорирования свободный хлор из воды улетучивается, однако в водопроводной воде всегда присутствует остаточный хлор, иногда, особенно в период паводков, в повышенных концентрациях. Поэтому воду рекомендуют перед употреблением отстоять в течение суток.

Кроме хлорирования используется озонирование и бактерицидное облучение.

*Озонирование*, заключающееся в окислении бактерий атомарным кислородом, образующимся при распаде озона.

*Бактерицидное облучение* осуществляется с использованием ультрафиолетовых лучей, под действием которых находящиеся в воде бактерии погибают.

#### *Общая схема и основные элементы очистной водопроводной станции*

Очистку воды можно условно разделить на три основных этапа.

На первом, подготовительном этапе сырая вода (вода из источника) подвергается обработке реагентами. Подготовка воды увеличивает эффективность последующих приёмов очистки.

Второй этап заключается в осаждении из воды взвешенных частиц.

На последнем этапе (фильтрацией) удаляются из воды мелкие суспензии, не задерживаемые осаждением.

Схема очистной водопроводной станции показана на рисунке 6.5. Все устройства, при помощи которых реагенты подготавливаются и в установленных дозах вносятся в сырую воду, носят общее название — *реагентное хозяйство* (на рис. 6.5 позиции 1, 2, 3).

Реагент в определённом количестве загружается в затворный бак 2. Сюда же подводится вода для растворения реагента. По мере растворения реагента приготовленные порции раствора, еще очень большой концентрации, выпускаются в один из растворных баков 2. Добавляя в него воду, снижают концентрацию реагента до необходимой величины. Обычно устанавливают два растворных бака. Пока идёт приготовление раствора в одном из баков, из другого бака раствор реагента расходуется на обработку сырой воды.



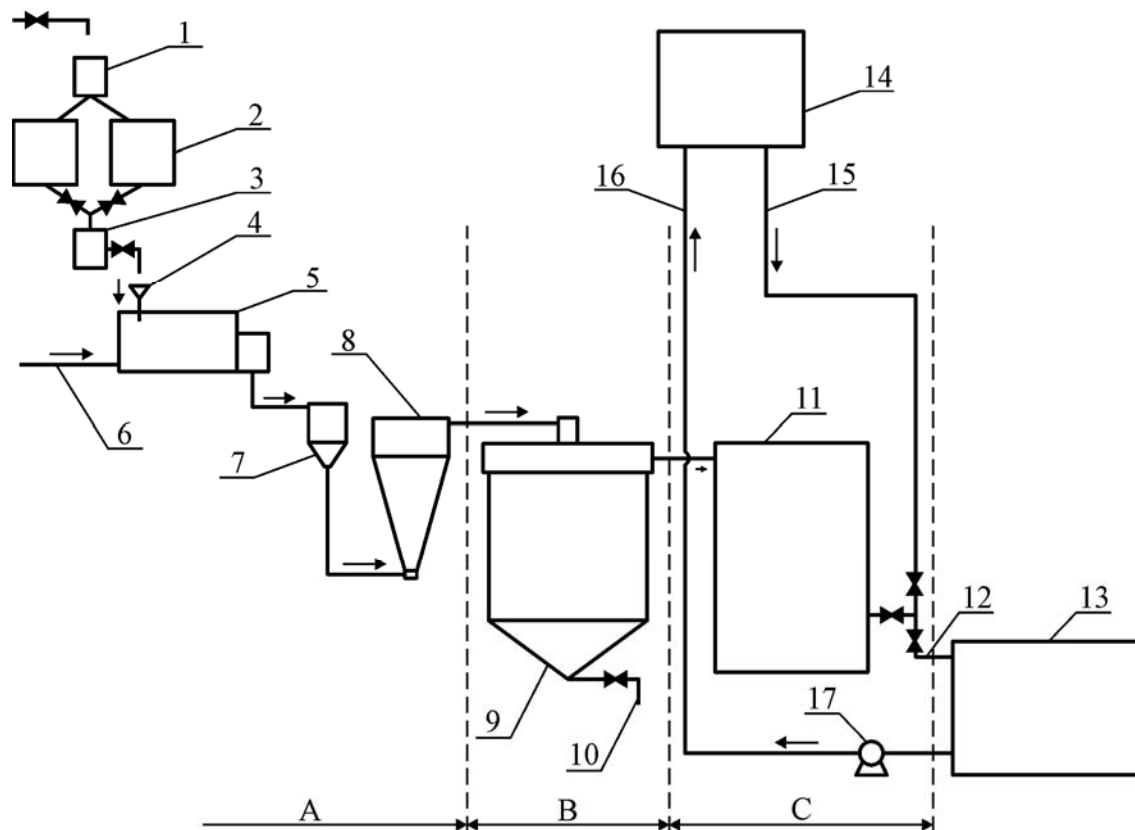


Рис. 6.5. Схема очистной водопроводной станции:

- A — подготовка воды; B — осаждение воды; C — фильтрация воды;*  
*1 — затворный бак; 2 — растворный бак; 3 — дозатор;*  
*4 — контрольная воронка; 5 — смеситель; 6 — труба воды*  
*поступающей для очистки; 7 — воздухоотделитель;*  
*8 — камера реакции; 9 — отстойник; 10 — труба удаления осадков;*  
*11 — фильтр; 12 — труба осветлённой чистой воды; 13 — резервуар*  
*чистой воды; 14 — резервуар обратного потока; 15 — труба*  
*обратного потока; 16 — труба чистой воды; 17 насос*

Из растворного бака 2 раствор нужной концентрации поступает в дозатор 3. Из дозатора раствор в необходимом количестве изливается открытой струёй в контрольную воронку 4, что даёт возможность следить за непрерывной подачей раствора. Затем раствор поступает в смеситель 5, где смешивается с сырой водой, поступающей по трубе 6.

Из смесителя вода, смешанная с реагентом, направляется в камеру реакции 8, в которой создаётся благоприятный гидравлический режим для хлопьеобразования. Над камерой установлен воздухоотделитель 7 для отделения пузырьков воздуха или газа, несомых потоком. Из камеры реакции 8 вода, в которой теперь образовались крупные тяжёлые хлопья, поступает в отстойник 9. Осветлённая вода из отстойника переходит в фильтр 11, а осаждённые в отстойнике хлопья периодически удаляются по трубе 10 в канализацию.

Профильтрованная через фильтр осветлённая вода по трубе 12 направляется в резервуар чистой воды 13. Фильтр, задерживая частицы взвесей, постепенно загрязняется, и производительность его падает. Промывают фильтр обратным током чистой воды из резервуара 14, в который вода по трубе 16 подаётся из резервуара чистой воды 13 насосом 17.

#### **6.4. Водонапорные и регулирующие сооружения**

Для обеспечения нормальной работы потребителей системы водоснабжения воду запасают в специальных водонапорных башнях, резервуарах и водохранилищах.

Применяемые в системах централизованного водоснабжения различные ёмкости классифицируют по следующим признакам:

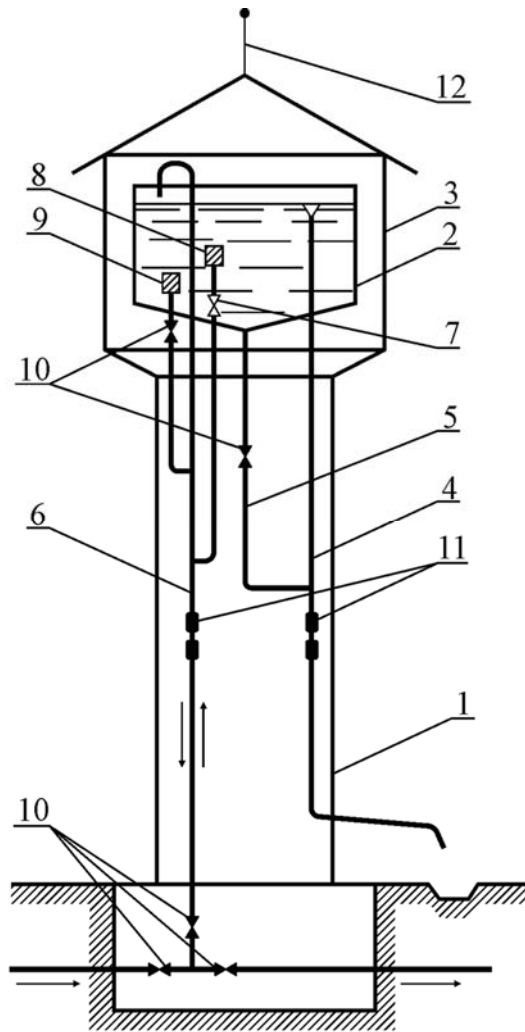
- *по назначению*: регулирующие, запасные и запасно-регулирующие;
- *по конструкции*: водонапорные башни, где требуемый напор создаётся резервуаром, размещённым на опоре определённой высоты; напорные резервуары — напор достигается расположением резервуара на возвышенности; пневматические установки — напор создаётся давлением сжатого воздуха на поверхность воды в герметичных резервуарах;
- *способу получения воды из ёмкостей*: напорные, обеспечивающие напор воды для подачи её в распределительную систему; безнапорные — вода из которых забирается насосами.

Напорно-регулирующие ёмкости обеспечивают более равномерную работу насосных станций и позволяют уменьшить диаметр и стоимость водоводов и магистралей распределительной сети. Запасные ёмкости повышают надёжность системы водоснабжения и способствуют обеспечению её бесперебойной работы.

Для обеспечения нормальной работы системы водоснабжения регулирующие и запасные объёмы воды аккумулируются в специальных сооружениях, например, в водонапорных башнях Рожновского.

Водонапорную башню устраивают в том случае, когда топографические условия местности не позволяют разместить водонапорный резервуар на отметке, необходимой для создания расчётного напора в сети.

Водонапорная башня Рожновского представляет собой инженерное сооружение, в верхней части которой находится запас воды, создающий необходимый напор в системе водоснабжения (рис. 6.6).



*Рис. 6.6. Водонапорная башня:*

- 1 — ствол; 2 — бак; 3 — шатёр; 4 — переливная труба;  
 5 — грязевая труба; 6 — подводяще-разводящая труба;  
 7 — обратный клапан; 8 — фильтр отбора воды на нужды  
 водопотребления; 9 — фильтр отбора воды на пожарные нужды;  
 10 — задвижки; 11 — компенсаторы; 12 — молниеотвод*

При заполнении водонапорной башни водой насос отключается. Его повторное включение осуществляется после снижения до нижнего фиксированного уровня воды в водонапорной башне.

Если водонапорные башни предназначены для создания определённого напора в водопроводной сети, то резервуары и водохранилища обеспечивают надёжность работы системы водоснабжения и более равномерную работу насосных станций.

## 6.5. Водопроводная сеть

Основное назначение водопроводной сети — подавать потребителям воду в требуемом количестве, хорошего качества и с необходимым напором.

Водопроводная сеть состоит из водоводов, магистральной сети и распределительных трубопроводов.

Для транспортирования воды от источника водоснабжения к очистным сооружениям и от резервуаров чистой воды к магистральной сети прокладывают водоводы. Для обеспечения бесперебойного поступления воды в водопроводную сеть водоводы укладываются не менее чем в две параллельные линии, расстояние между которыми принимается от 10 до 100 м, а пропускная способность каждой из них должна составлять не менее 70% расчётного расхода системы водоснабжения. Магистральная сеть служит в основном для транзитного транспортирования необходимого количества воды, а распределительная — для передачи воды из магистралей к отдельным потребителям через домовые вводы [11].

Глубину заложения водоводов и водопроводных сетей принимают такую, чтобы исключить возможность замерзания воды в зимний период и нагрева её в летнее время. При этом минимальная глубина залегания трубопроводов должна быть на 0,3...0,5 м больше расчётной глубины.

Обычно водопроводная система наряду с подачей воды для хозяйственных нужд обеспечивает ещё и нужды пожаротушения.

Проектируют водопроводную сеть с учётом совместной работы насосных станций, водонапорной башни и других элементов системы водоснабжения.

Ввиду рассредоточенности сельскохозяйственных потребителей стоимость коммуникаций по транспорту воды составляет около 70% всей стоимости сооружений водоснабжения [12].

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Попов, Н.М. Электроснабжение : справочник электрика / Н.М. Попов, Д.М. Олин. — Кострома : КГСХА, 2005. — 102 с.
2. Касаткин, А.С. Электротехника : учебник для вузов. — М. : Энергия, 1973. — 500 с.
3. Ванюшин, М. Первые шаги в электротехнику. Просто о сложном. — СПб. : Наука и техника, 2011. — 352 с.
4. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. — 6-е. изд. — М. : Высшая школа, 1973.— 752 с.
5. Библия электрика: ПУЭ, МПОТ, ПТЭ. — Новосибирск : изд-во Сиб. универ., 2008. — 606 с.
6. Епифанов, А.П. Электрические машины : учебник. — СПб. : Лань, 2006. — 272 с.
7. Баутин, В.М. Энергетика для села / В.М. Баутин, В.В. Лазовский. — М. : ФГНУ «Росинформагротех», 2002. — 184 с.
8. Прищеп, Л.Г. Учебник сельского электрика. — М. : Агропромиздат, 1986. — 509 с.
9. Михальчук, А.Н. Спутник сельского электрика : справочник. — М. : Росагропромиздат, 1989. — 254 с.
10. Теплотехника и теплоэнергетика : справочник / под общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. — М. : Энергоатомиздат, 1987. — 456 с.
11. Проектирование и расчет систем водоснабжения сельского населенного пункта / В.Д. Фетисов, И.В. Загородняя. — Краснодар : 2004. — 112 с.
12. Гидравлика, водоснабжение и канализация сельских населенных пунктов / Г.И. Николадзе, Д.С. Циклаури. — М. : Стройиздат, 1982. — 200 с.
13. Попов, Н.М. Эксплуатация погружных электродвигателей в сельскохозяйственном производстве / Н.М. Попов, Д.М. Матыцин. — Кострома. : КГСХА, 2008. — 128 с.
14. Насосы и насосные станции для систем водоснабжения, отопления и канализации / Режим доступа: [www.pumpstore.ru/pogrujnie-nasosy.html](http://www.pumpstore.ru/pogrujnie-nasosy.html) свободный. — Загл. с экрана. — Яз. рус.

*Учебно-теоретическое издание*

**Попов, Н.М.** Основы энергетики : учебное пособие / Н.М. Попов, Д.М. Олин. — Караваево : Костромская ГСХА, 2015. — 110 с.

Гл. редактор Н.В. Киселева  
Редактор выпуска Т.В. Тарбеева  
Корректор Т.В. Кулинич

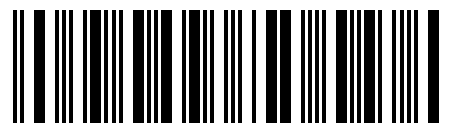
© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Костромская государственная сельскохозяйственная академия" 156530, Костромская обл., Костромской район, пос. Караваево, уч. городок, д. 34, КГСХА

Компьютерный набор. Подписано в печать 10/07/2015.  
Заказ №389. Формат 84х60/16. Тираж 100 экз. Усл.  
печ. л. 6,72. Бумага офсетная. Отпечатано 12/08/2015.  
Цена 62,00 руб.

Отпечатано с готовых оригинал-макетов в академической типографии на цифровом дубликаторе. Качество соответствует предоставленным оригиналам.



Цена 62,00 руб.



2015\*389